



KIRCHLICHE
PÄDAGOGISCHE
HOCHSCHULE
WIEN/KREMS



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Empirische Untersuchung
zu Schülervorstellungen zur Relativitätstheorie

verfasst von / submitted by

Stefan Brenner, BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien, 2022 / Vienna, 2022

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 199 520 523 02

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) UF Mathematik
UF Physik

Betreut von / Supervisor:

Mag. Dr. Hildegard Urban-Woldron, Privatdoz.

Danksagung

Ich danke meinem Herrn und Erlöser Jesus Christus der mir das Leben geschenkt und das wunderbare Universum, dessen Zusammenhänge in der Physik erforscht werden, geschaffen hat. Ihm allein sei alle Ehre, ihm verdanke ich alles, insbesondere, dass er mir die vielen Menschen in mein Leben gestellt hat denen ich nun danken möchte.

Meiner Ehefrau Kateryna danke ich für ihr Vorbild an Fleiß, ihren Beistand durch mein ganzes Studium hindurch und ihre Ermutigung in schwierigen Zeiten.

Zu großem Dank bin ich meinen Eltern verpflichtet durch deren liebevolle Erziehung und Förderung es mir überhaupt erst möglich war dieses Studium zu betreiben.

Ich danke besonders Dr. Hildegard Urban-Woldron, Privatdoz. für ihre großartige Unterstützung bei der Themenfindung, ihre Vorschläge zur Gestaltung der Studie und der Arbeit sowie ihre Ratschläge in organisatorischen Fragen. Ihre schnellen Rückmeldungen, die sowohl freundlich als auch präzise waren, ermöglichten es mir erst sinnvoll zu forschen und den Arbeitsablauf effizient zu gestalten. Ich danke ihr auch für ihre Bereitschaft mir Ihre Unterstützung für dieses Projekt bereits lange vor dessen Durchführung zuzusichern.

Allen 13 Schülerinnen und Schülern, die sich dazu bereit erklärt hatten an den Interviews teilzunehmen gilt mein ganz besonderer Dank. Ohne sie wäre dies alles unmöglich gewesen.

Meinem Vater sowie meiner Kollegin und Freundin, Judith Mew, danke ich für ihre Mühe beim Lesen der Arbeit und ihr Anmerken der vielen Beistrich- und Tippfehler sowie ihre Anmerkungen zur Verbesserung der sprachlichen Gestaltung. Weiters danke ich Dr. Christian Spreitzer für seine Rückmeldungen zum fachlichen Hintergrund und die Hinweise zu Tippfehlern in den vielen Gleichungen.

Ich danke auch meiner Physiklehrerin im Gymnasium, Kathrin Roithner, dafür, dass sie mich, als ich in meinem letzten Schuljahr erstmals Interesse an Physik zeigte, förderte und mich trotz der schlechten Leistungen in den vorangegangenen Jahren in meinem Entschluss Physik zu studieren bestärkte.

Schließlich danke ich noch allen Menschen die für mich in Bezug auf mein Studium und diese Arbeit gebetet haben, allem voran wiederum meiner Frau und meinen Eltern.

Kurzfassung

Schülervorstellungen spielen in der Physikdidaktik eine entscheidende Rolle für die Erforschung, Planung, Durchführung und Evaluierung von Physikunterricht. Da zur speziellen Relativitätstheorie jedoch nur wenige Befunde zu den Vorstellungen der Schüler existieren ist die zentrale Frage dieser Arbeit, welche Vorstellungen die Schüler in den Unterricht mitbringen, und welche nach dem Schulunterricht zum Thema vorliegen. Somit soll erhoben werden, welche Voraussetzungen zu Beginn des Unterrichts gegeben sind, um die Entwicklung von adäquaten Unterrichtskonzepten, die daran anknüpfen, zu ermöglichen. Die Vorstellungen der Schüler nach dem Unterricht werden erhoben, um die Effektivität des Physikunterrichts beim Vermitteln der zentralen Konzepte der speziellen Relativitätstheorie zu überprüfen. Somit soll nach Hinweisen für mögliche Probleme des Physikunterrichts gesucht werden, um eine Verbesserung zu ermöglichen. Zur Erforschung der Vorstellungen der Schüler werden kurz vor und direkt nach dem Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie problemzentrierte Interviews durchgeführt. Weiters werden, aufgrund ihrer oft großen Bedeutung für den Physikunterricht, auch die Darstellungen zur speziellen Relativitätstheorie in den in Österreich approbierten Schulbüchern analysiert. Dadurch sollen mögliche Ansätze für Unterrichtskonzepte gefunden und problematische Formulierungen und Konzepte identifiziert werden. In den Interviews zeigt sich, dass die meisten Schüler für die besprochene Situation eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips haben, jedoch ein ausgezeichnetes, äußeres Bezugssystem nicht ausschließen. Es finden sich viele Hinweise auf die Vorstellung absoluter Bewegung. Im Gegensatz dazu wird die Erde kaum als ausgezeichnetes Bezugssystem betrachtet. Die meisten Schüler wenden die klassische Geschwindigkeitsaddition gut an und sind von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht. Einige verlangen auch nach dem Unterricht noch eine Erklärung für diese. Gleichzeitigkeit wird vor dem Unterricht von den Schülern als absolut angesehen, nach dem Unterricht sieht nicht einmal die Hälfte sie als relativ an. Viele begründen sie mit der Lichtlaufzeit. Längen werden vor dem Unterricht als absolut angesehen, nach dem Unterricht rechnen viele Schüler mit einer Änderung der Länge, jedoch nur rund die Hälfte jedenfalls mit einer Verkürzung in einem relativ zur gemessenen Strecke bewegten System. Einige Schüler wenden die Längenkontraktion asymmetrisch an.

Abstract

In didactics of physics student's conceptions play a crucial role for the exploration, planning, execution, and evaluation of physics classes. Since there exist only few results on the conceptions of students in special relativity it is the central question of this paper, which conceptions the students have before and after the physics class concerning this topic. The target is to make clear which preconditions are given at the beginning of the physics class to make the development of an appropriate concept for lessons possible. The conceptions of students after the class are explored to test the effectiveness of the class in teaching the key ideas of special relativity. Those results shall be used to discover indications of the problems of the physics class to facilitate improvements. To explore the conceptions of students, problem-centered interviews are conducted shortly before and right after the class on special relativity. Since school textbooks are usually of great importance for the physics class, the chapters concerning special relativity in Austrian school textbooks will also be analyzed. This analysis shall shed a light on possible approaches for a concept for lessons, and problematic wordings and concepts shall be identified. Results show that most pupils have an appropriate understanding of the principle of relativity for the given situation. Several students do not exclude the possibility of an outward absolute frame of reference. There are a lot of indications, that students have the idea of absolute movement. Students usually do not look at earth as an absolute inertial frame. Most pupils are able to use the classical velocity-addition properly and are surprised by the fact that the speed of light is a constant value for every observer. Some pupils ask for a reason for the principle of the constancy of the speed of light. Before the class on special relativity pupils view simultaneity as absolute, after the class not even half of the students think that it depends on the state of movement of the observer. A lot of students explain the relativity of simultaneity with respect to the time light needs to travel from its source to an observer. Pupils think that lengths are absolute before the class on special relativity, after the class a lot of them expect lengths to change with respect to the relative velocity. Just half of the students always expect the length to be contracted in a system moving relative to the measured distance. Several students use length contraction in an asymmetrical way.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
2. Forschungsstand	10
2.1. Lernpsychologische und didaktische Grundlagen	10
2.2. Schülervorstellungen zur speziellen Relativitätstheorie	16
2.3. Forschungsfrage	23
3. Fachlicher Hintergrund	25
3.1. Maxwell-Gleichungen und Galilei-Transformation	25
3.2. Die Lorentz-Transformation	29
3.3. Relativistische Effekte	36
4. Analyse der Schulbücher in Österreich	46
4.1. Sexl Physik 8	48
4.2. Physik compact 8	53
4.3. big bang 8	56
5. Forschungsmethode	61
6. Ergebnisse der 1. Interviewrunde	65
6.1. Relativitätsprinzip	65
6.2. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	72
6.3. Gleichzeitigkeit	104
6.4. Relativität von Raum und Längen	123
6.5. Folgerungen	148
7. Ergebnisse der 2. Interviewrunde	151
7.1. Relativitätsprinzip	151
7.2. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	159
7.3. Gleichzeitigkeit	184
7.4. Relativität von Raum und Längen	207
7.5. Folgerungen	230
8. Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion	233
Literatur	237
Internetquellen	240
A. Interviewleitfaden	241
A.1. Relativitätsprinzip	241

A.2. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	241
A.3. Gleichzeitigkeit	243
A.4. Relativität von Raum und Längen	244
B. Transkripte der 1. Interviewrunde	246
C. Transkripte der 2. Interviewrunde	295

Abbildungsverzeichnis

3.1 Minkowski-Diagramm zur Relativität der Gleichzeitigkeit	41
6.1 Relativitätsprinzip	65
6.2 Klassische Geschwindigkeitsaddition - sitzender Passagier	72
6.3 Klassische Geschwindigkeitsaddition - gehender Passagier	72
6.4 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit - Lampe auf Raumschiff B	73
6.5 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit - Lampe auf Raumschiff A	73
6.6 Gleichzeitigkeit 1	105
6.7 Gleichzeitigkeit 2	105
6.8 Längenkontraktion - Bowlingbahn auf Raumschiff B	123
6.9 Längenkontraktion - Bowlingbahn auf Raumschiff A	123
6.10 Längenkontraktion - Bowlingbahn auf der Erde	124
A.1 Relativitätsprinzip	241
A.2 Klassische Geschwindigkeitsaddition - sitzender Passagier	242
A.3 Klassische Geschwindigkeitsaddition - gehender Passagier	242
A.4 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit - Lampe auf Raumschiff B	242
A.5 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit - Lampe auf Raumschiff A	242
A.6 Gleichzeitigkeit 1	243
A.7 Gleichzeitigkeit 2	243
A.8 Längenkontraktion - Bowlingbahn auf Raumschiff B	244
A.9 Längenkontraktion - Bowlingbahn auf Raumschiff A	244
A.10 Längenkontraktion - Bowlingbahn auf der Erde	245

Tabellenverzeichnis

5.1. Dauer der Interviews der ersten Interviewrunde in Minuten.	63
5.2. Anzahl der befragten Schüler und Schülerinnen aus den verschiedenen Schulformen.	63
5.3. Altersverteilung der befragten Schüler beim ersten und zweiten Interview.	63
5.4. Dauer der Interviews der zweiten Interviewrunde in Minuten.	64

1. Einleitung

Die Relativitätstheorie stellt mit ihren vielen der Alltagserfahrung widersprechenden Aussagen, die jedoch hervorragend experimentell bestätigt sind, eine der faszinierendsten Theorien der Physik dar. Für den Autor der Arbeit waren die Auswirkungen von Gravitation und Bewegung auf den Gang der Zeit der Auslöser für die Begeisterung für das gesamte Fach. Da auch Gespräche über diese Themen mit Leuten, die sich sonst nicht für Physik zu interessieren scheinen, oft großes Interesse an den von der Relativitätstheorie beschriebenen Effekten nahelegt, und sich auch in der Forschungsliteratur Hinweise darauf finden lassen, dass dieses Thema auf großes Interesse bei den Schülern¹ stößt, sollte diese Theorie einen günstigen Anknüpfungspunkt für die Behandlung einer modernen physikalischen Sichtweise bieten. Dennoch lassen sich zu diesem Thema kaum Forschungsarbeiten finden, die die Erstellung eines geeigneten Unterrichtskonzepts ermöglichen. Anders als in den meisten anderen Gebieten der Schulphysik gibt es auch noch kein ausgearbeitetes Unterrichtskonzept wie z. B. das „Elektronengasmodell“ [BWW14] für die Elektrizitätslehre, oder den „milq-Lehrgang“ [1] für die Quantenphysik. Die meisten Darstellungen in der populärwissenschaftlichen Literatur sind zu oberflächlich, um Unterricht darauf aufzubauen, und die Darstellungen in Fachbüchern zu mathematisch. In Schulbüchern finden sich teilweise problematische Formulierungen, und es werden teilweise falsche Konzepte vermittelt.

Aufgrund des hohen Interesses würde die spezielle Relativitätstheorie eine gute Basis für die Behandlung der modernen Physik bieten. Da dem Autor aufgrund seines eigenen Interesses an diesem Teilgebiet der Physik gut gestalteter Unterricht zu diesem Thema besonders wichtig ist, fiel schnell die Entscheidung zur Erforschung der Vorstellungen, die die Schüler in den Unterricht mitbringen, und jener, die sie nach dem Unterricht haben. Somit soll eine Grundlage für größere, quantitative Untersuchungen und schlussendlich für die Gestaltung eines adäquaten Unterrichtskonzepts gelegt werden.

Zunächst wird dazu die Relevanz der Erforschung von Schülervorstellungen anhand der Fachliteratur verdeutlicht und der Forschungsstand zu den Vorstellungen in der speziellen Relativitätstheorie erhoben (Kapitel 2).

In Kapitel 3 werden die physikalischen Grundlagen für die in der Schule behandelten Aspekte der speziellen Relativitätstheorie besprochen. Dieses Kapitel versteht sich nicht als Unterrichtsvorschlag, sondern als Aufbereitung des notwendigen Hintergrundwissens, um dieses Thema korrekt unterrichten zu können.

Da die Schulbücher oft große Verwendung im Physikunterricht finden, werden die Darstellungen zur speziellen Relativitätstheorie in den österreichischen Schulbüchern in Kapitel 4 analysiert. Dabei wird auf gute Ansätze ebenso hingewiesen wie auf problematische For-

¹Zur besseren Lesbarkeit wird immer nur ein Geschlecht angegeben. Alle Bezeichnungen sind geschlechtsneutral zu verstehen.

mulierungen und Konzepte.

Die Forschungsmethode und das Forschungsdesign werden ausführlich in Kapitel 5 beschrieben.

In den Kapiteln 6 und 7 werden die Vorstellungen der Schüler vor und nach dem Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie empirisch untersucht. Die Ergebnisse werden zusammengestellt, um eine günstige Basis für die weitere Forschung zu legen.

Schließlich werden die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojekts in Kapitel 8 zusammengefasst.

2. Forschungsstand

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die lernpsychologischen und didaktischen Grundlagen gegeben. Dadurch soll insbesondere die Notwendigkeit der Erforschung von Schülervorstellungen geklärt werden. Anschließend werden für dieses Projekt relevante, bereits bekannte Ergebnisse besprochen. Aus diesen Grundlagen wird schließlich die Forschungsfrage abgeleitet.

2.1. Lernpsychologische und didaktische Grundlagen

2.1.1. Konstruktivistische Lerntheorien

Die moderne Physikdidaktik beruht maßgeblich auf konstruktivistischen Lerntheorien [Dui09]. Diesem Ansatz nach ist zunächst das zu vermittelnde Wissen selbst eine Konstruktion und somit veränderlich, unabgeschlossen und fehlbar [Rei08]²³. Weiters wird auch der Wissenserwerb selbst als Konstruktion des lernenden Individuums betrachtet. Die Annahme ist also, dass das Wissen nicht in einer bloßen kognitiven Übernahme wie im Nürnberger Trichter erworben werden kann, sondern nur in Handlungen der Lernenden selbst. Duit fasst diesen Punkt in dem Satz „Jeder ist seines Wissens Schmied.“ zusammen [Dui09]. Beim Wissenserwerb sind, dieser Theorie nach, die drei Prozesse der Konstruktion, der Rekonstruktion und der Dekonstruktion, die nachstehend aufgelistet sind, zentral und müssen somit auch im Unterricht berücksichtigt werden [Rei08].

- **Konstruktion:** Die Schüler müssen sich das Wissen konstruktiv selbst erwerben. Das bedeutet, dass sie sich in zahlreichen Handlungen, wie Untersuchungen und Experimenten, das Wissen aneignen müssen. Dabei sind sowohl die Selbsttätigkeit als auch die Selbstbestimmung der Lernenden wichtig. Die Selbstbestimmung kann sich dabei z. B. in Redeanteilen, oder aber auch in der Auswahl von Themen ausdrücken, was jedoch im Rahmen eines vorgegebenen Lehrplans nicht grenzenlos möglich ist [Rei08].
- **Rekonstruktion:** Die Schüler müssen ihre Welt selbst entdecken und dabei auch Entdeckungen, die andere bereits vor ihnen gemacht haben, nachentdecken. Wichtig ist hierbei, dass solche Nachentdeckungen nicht belächelt werden, da sonst Lernende dazu verleitet werden könnten, ihre Entdeckungsgabe zu vernachlässigen. Weiters gehört es zur Rekonstruktion, nicht nur Faktenwissen anzuhäufen, sondern auch über die Motive derjenigen nachzudenken, die die jeweiligen Inhalte entdeckt und beobachtet haben. Es muss immer auch die Frage danach gestellt werden, was die

²Interessant ist dabei, dass das Unterrichten der speziellen Relativitätstheorie diesem Ansatz besonders nahe steht, da die Lernenden erstmals damit konfrontiert werden, dass eine bewährte physikalische Theorie (in diesem Fall die klassische Mechanik) aufgrund neuer Erkenntnisse revidiert werden muss. Gerade dieses Thema scheint also besonders günstige Bedingungen zu liefern, um mehr über die Natur der Naturwissenschaften im Unterricht zu vermitteln.

³Einen ähnlichen Gedanken äußerte auch schon der Apostel Paulus im 1. Jahrhundert n. Chr. „Denn wir erkennen stückweise, (...)“ [Kor13]. Dabei bezieht er sich zwar nicht explizit auf wissenschaftliche Erkenntnis, sondern auf die Erkenntnis Gottes, dennoch geht der Ansatz in eine ähnliche Richtung.

damaligen Beobachter dazu geführt haben könnte, ihre jeweilige Beobachtung genau so festzulegen [Rei08].

- Dekonstruktion: Damit ist nicht gemeint, dass die Schüler lernen sollen, skeptisch alles zu bezweifeln, sondern, ihren Blickwinkel zu verschieben und auch scheinbar Selbstverständliches kritisch zu hinterfragen. Dies steht auch in Zusammenhang mit wissenschaftlichem Arbeiten, da der Erkenntnisprozess in der Wissenschaft meist nicht linear verläuft⁴. Dazu gehört auch eine kritische Selbstbeobachtung [Rei08].

Aus dem beschriebenen Ansatz heraus ist klar, dass Unterricht keine reine Präsentation der Lehrkraft sein kann, sondern verschiedene Formen umfassen muss, die auch die Eigentätigkeit der Schüler fördern [DHR13]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Studien zeigen, dass der Frontalunterricht, bzw. die direkte Instruktion, anderen Formen des Unterrichts in Bezug auf die Vermittlung notwendigen Fachwissens überlegen ist [DHR13].

Einen Vorschlag zum grundsätzlichen Aufbau von Lernvorgängen lieferte John Dewey mit seinen „5 Stufen des Lernens“ bereits im Jahr 1910 [Dew10]. Obwohl dieses Modell dementsprechend bereits vor langer Zeit entwickelt wurde, ist es heute (oft stillschweigend) immer noch die Grundlage für viele didaktische Konzepte und eine viel verwendete Strukturierungshilfe für Unterricht [Rei08]. Es wird dabei davon ausgegangen, dass für den Lernprozess die folgenden fünf Stufen zu beachten sind:

- Emotionale Antwort: Die Schüler werden zunächst mit einem unerwarteten Problem konfrontiert und müssen nach einer Lösung suchen. Hierbei ist es, nach Dewey, von großer Bedeutung, dass die Lernenden auf dieses Problem nicht nur kognitiv, sondern auch emotional reagieren, da dies die Grundvoraussetzung dafür ist zu verstehen, weshalb etwas gelernt werden soll [Rei08].
- Definition des Problems: Der emotionalen Reaktion folgt eine intellektuelle Reaktion, indem die Schüler aktiv das Problem mit bereits Erlerntem verknüpfen, um das Problem näher zu bestimmen. Dafür benötigen sie Raum zum Austausch. Dementsprechend ist es auch besonders wichtig, dass eine Lehrkraft hier keine schnellen Antworten liefert [Rei08].
- Hypothesenbildung: Die Lernenden versuchen, bereits vertraute Methoden auf das neue Problem anzuwenden, oder generieren Hypothesen über ein mögliches weiteres Vorgehen. Der Lehrkraft kommt hierbei insbesondere die Rolle zu, die Hypothesen der Schüler zu sammeln [Rei08].
- Testen und Experimentieren: Die Lernenden bekommen die Möglichkeit, ihre Hypothesen selbst zu überprüfen (z. B. durch Experimente) [Rei08].

⁴Gerade dieser Aspekt wird in der Geschichte der Relativitätstheorie deutlich, da diese nur entdeckt werden konnte, indem Einstein die als selbstverständlich geltenden Galilei-Transformationen hinterfragte (siehe Kapitel 3).

- Anwendung: Das von den Schülern erworbene (bzw. konstruierte) neue Wissen soll in möglichst vielen verschiedenen Situationen angewendet werden, um deutlich zu machen, was mit dem Lernergebnis erreicht werden kann. Dies ist auch wichtig um durch mehrmaliges Anwenden den Lernertrag zu sichern [Rei08]⁵.

Dewey selbst hatte ursprünglich im Sinn, dass die Lernenden dabei die Probleme selbst herausfinden und lösen. Heute herrscht eher eine gemäßigte Version dieses Zugangs vor, die es erlaubt, dass Probleme auch von der Lehrkraft eingeführt und gemeinsam mit den Schülern gelöst werden [Rei08].

2.1.2. Schülervorstellungen

Das weit verbreitete Stufenmodell von Dewey hat große Implikationen für den Physikunterricht. Das beschränkt sich nicht nur auf die äußere Form des Unterrichts, sondern insbesondere auch auf die Art, wie die physikalischen Inhalte besprochen werden. Bei den Phasen der „Definition des Problems“ und der „Hypothesenbildung“ wird die Bedeutung des bei den Schülern bereits vorhandenen Wissens besonders deutlich. Das Problem dabei ist, dass dies nicht nur das bereits zuvor in der Schule (oder anderswo) erworbene Fachwissen beinhaltet, mit dem gut weitergearbeitet werden kann, sondern ebenso Vorstellungen, die aus der Alltagserfahrung heraus entstanden und meist nicht mit den physikalischen Vorstellungen vereinbar sind [Dui09]. In der Physik sind diese, als Schülervorstellungen bezeichneten, von den Lernenden mitgebrachten Ideen besonders umfassend, da die Physik sich insbesondere mit Phänomenen in Natur und Technik beschäftigt, von denen die Schüler täglich umgeben sind. Folglich ist klar, dass die Lernenden bei den meisten Themen des Physikunterrichts bereits eigene Vorstellungen mitbringen. Dies muss bei jeder Unterrichtsform mitgedacht werden [Dui09].

Aus den zuvor behandelten Grundlagen ist klar, dass solche Vorstellungen der Schüler bei der Planung von Unterricht berücksichtigt werden müssen, da sonst Fehlvorstellungen durch den Unterricht sogar verstärkt werden können. Insbesondere kann dies passieren, indem eine Lehrkraft mit einer korrekten physikalischen Vorstellung im Hinterkopf eine Aussage tätigt, die die Schüler in Ermangelung eben dieser Vorstellung ganz anders verstehen als von der Lehrkraft beabsichtigt. Die Schüler geben der Aussage daraufhin eine ganz andere Bedeutung, was ein Hindernis im weiteren Lernprozess darstellen kann [Dui09].

Eine diesbezüglich offene Frage ist, ob die Vorstellungen der Schüler tief verankert seien, wie z. B. Duit argumentiert [Dui09], und ein zusammenhängendes System bilden, oder

⁵Die Nähe zu diesen Stufen wird bei vielen didaktischen Konzepten deutlich, z. B. beim „BSCS 5E instructional model“ [Byb15] oder in der, in Japan entwickelten, „Hypothesis Experiment Class“ [IF19], kurz „HEC“. Im zweiten Beispiel ist die Ähnlichkeit besonders klar, da es das Ziel ist, dass die Schüler zu physikalischen Problemen Hypothesen bilden, die von der Lehrkraft gesammelt und mithilfe von Experimenten überprüft werden. Anschließend sollen die Schüler selbst die Schlussfolgerungen aus dem Experiment ziehen. Itakura wollte dadurch die Arbeitsweise der Physik deutlich machen - in der Forschung sagt den Physikern schließlich auch niemand nach dem Experiment, was daraus zu lernen ist. Auch dieser Punkt wird bei der historischen Entdeckung der Relativitätstheorie deutlich.

ob es sich um nicht zusammenhängende Bruchstücke handle, die sich auch je nach Situation und Fragestellung (oder sogar innerhalb einer Situation) ändern können, wie diSessa es beschreibt [diS88]. Scherr unterscheidet deshalb in einem Artikel über das Denken von Schülern [Sch07] zwischen „Misconceptions“, die den klassischen Schülervorstellungen nach Duit [Dui09] entsprechen und „Pieces“, nach diSessa [diS88]. Dabei ordnet sie den beiden Arten von Vorstellungen jeweils fünf Eigenschaften zu:

- „Misconceptions“ sind nach Scherr falsche, schwer korrigierbare, kohärente, stabile und kontextunabhängige Ideen der Lernenden [Sch07].
- „Pieces“ bezeichnet Scherr hingegen als Ideen mit (zumindest potenziell) nicht bestimmtem Wahrheitswert, die leicht formbar, unabhängig voneinander, fluktuierend und kontextabhängig sind [Sch07].

Dabei bedeutet „stabil“, dass die Ideen in Argumentationen konsequent benutzt werden, sich also nicht ständig ändern („fluktuieren“). Scherr bemerkt dabei, dass die als „Pieces“ bezeichneten Ideen zwar kein Netzwerk bilden müssen (also „unabhängig voneinander“ sind), dies aber auch der Fall sein kann. Der „unbestimmte Wahrheitswert“ bedeutet, dass manche Ideen der Schüler so unspezifisch sind, dass ihnen kein Wahrheitswert zugeordnet werden kann. Als Beispiel nennt sie die Vorstellung „Von mehr kommt mehr“, die richtig ist, wenn damit die Beziehung zwischen Nettokraft und Beschleunigung beschrieben wird, aber falsch, wenn sie benutzt wird, um die Beziehung zwischen Nettokraft und Geschwindigkeit zu beschreiben [Sch07]. Beide Modelle zu den Ideen der Schüler haben ihre Stärken und Schwächen, und es ist klar, dass keines davon einen Anspruch auf Vollständigkeit stellt. Der Ansatz der tief verankerten Vorstellungen ist jedoch weiter verbreitet und in vielen Bereichen der Physik gut erforscht [DSWH18]. Außerdem bleibt die Frage danach, ob es sich um fest verankerte Vorstellungen, oder einzelne Fragmente handelt, im Hintergrund, wenn bedacht wird, dass die erforschten und formulierten Schülervorstellungen nicht exakt in dieser Form in den Köpfen der Lernenden existieren, sondern diese sich, wenn sie Stellung zu physikalischen Fragen beziehen, so äußern, als ob sie diese spezielle Vorstellung im Hinterkopf hätten. Werden die Schülervorstellungen so verwendet, so helfen sie jedenfalls dabei, Aussagen von Schülern besser zu verstehen und einzuordnen [DSWH18].

Weiters spielen die Vorstellungen der Schüler zur Art der Erkenntnisgewinnung in der Physik, und dazu, was es bedeutet, Physik zu lernen und zu verstehen, die sogenannten epistemologischen Vorstellungen, eine Rolle beim Physiklernen. Die Art und Weise wie Schüler Physik lernen hängt nach Elby [Elb01] mit diesen Vorstellungen zusammen. Betrachten die Schüler Physik als nicht zusammenhängende Einzelteile und Formeln, neigen sie dazu, fachliche Inhalte auswendig zu lernen. Betrachten sie die Physik hingegen als kohärentes Netz und das Lernen als Prozess, in dem sie fundamentale Konzepte zum Problemlösen verwenden, so neigen sie dazu, ein tieferes konzeptuelles Verständnis zu erlangen [Elb01]. Außerdem gehört das Lernen über die Art, wie in der Physik gearbeitet wird und wie Erkenntnisse erworben werden, ebenfalls zu den Bildungszielen, sodass es

notwendig scheint, diese Aspekte in den Unterricht zu integrieren [WSH17]. Oft entwickeln Schüler eine stark empiristische Vorstellung, glauben also, dass das physikalische Wissen direkt aus den Experimenten gefolgert wird, ohne dass die theoretischen Vorannahmen eine große Rolle spielen [WSH17]. Da es wichtig ist, die epistemologischen Vorstellungen von Schülern zu verändern, sollten diese ebenfalls im Unterricht adressiert werden. Eine Studie von Elby legt nahe, dass die epistemologischen Ansichten der Schüler nur durch eine direkte Adressierung zu verbessern sind [Elb01]. Dem widerspricht jedoch eine Studie von Hull [HLADL16]. In letzterer zeigten sich Verbesserungen in den epistemologischen Ansichten von Schülern, die zwei Kurse besucht hatten, die keine konsistente epistemologische Ansicht vermittelten. Zusätzlich behauptet Elby zwar, dass der akademische Erfolg von Schülern mit ihren epistemologischen Ansichten zusammenhängt [Elb01], was auch plausibel wäre, es liegen aber noch keine Daten aus empirischen Untersuchungen vor, die das klar belegen [WSH17]. Ungeachtet der Unsicherheiten auf diesem Gebiet ist klar, dass eine direkte Adressierung der epistemologischen Vorstellungen der Schüler wünschenswert ist, um ein umfassenderes Bild der Physik zu vermitteln. Insbesondere die Behandlung der speziellen Relativitätstheorie und ihrer Entstehungsgeschichte kann dazu wertvolle Beiträge leisten.

Weiters ist zu berücksichtigen, dass auch manche Lehrkräfte selbst Vorstellungen in den Unterricht mitbringen, die nicht mit einer wissenschaftlichen Sicht über Physik und das Lernen kompatibel sind. Dass Alltagsvorstellungen zu physikalischen Inhalten vorliegen ist auch zu erwarten, da nicht alle Inhalte von einem Lehramtsstudium auf wünschenswerte Weise abgedeckt werden können. Es scheint aber auch so zu sein, dass unter einigen Lehrern die Vorstellung besteht, dass sie ihr Wissen einfach an die Schüler transportieren können. Die Vorstellungen von Lehrkräften sind denen von Schülern also teilweise nicht unähnlich [Dui09].

2.1.3. Konzeptwechsel

Um Physik zu lernen, ist es notwendig, nachhaltig von Alltagsvorstellungen zu physikalischen Sichtweisen zu wechseln. Es zeigt sich jedoch, dass die Alltagsvorstellungen meist nicht aufgegeben werden, sodass es das Ziel sein muss die naturwissenschaftlichen Vorstellungen als Alternative zu präsentieren, die in bestimmten Situationen angemessener und fruchtbarer ist [Dui09]. Ein Problem dabei ist, dass Schülervorstellungen sich oft nicht einfach durch experimentelle Befunde bzw. Beobachtungen der Schüler bei Experimenten korrigieren lassen. Dies hat offenbar zwei Gründe [DSWH18]:

- Die Vorstellungen bestimmen auch, was die Lernenden bei den Experimenten beobachten. Oft sehen Schüler das, was sie zu sehen erwarten. Wird z. B. ein Experiment durchgeführt, bei dem ein langer Draht zum Glühen gebracht wird, so sehen Schüler, die überzeugt davon sind, dass der Draht zuerst an dem Ende zu leuchten beginnt, an dem der Strom zuerst hineinfließt auch genau das, obwohl der gesamte Draht zu glühen beginnt [Sch91]. Das ist auch der Grund aus dem beim japanischen Konzept

der „Hypothesis Experiment Class“, kurz „HEC“, die Schüler die Schlussfolgerungen aus den Experimenten selbst ziehen sollen. Itakura argumentiert, dass man andernfalls den Schülern „eine Theorie brutal aufzwingen“ würde [IF19].

- Bei der Änderung der Ansicht zu einem Thema spielt nicht allein die logische Einsicht eine Rolle, sondern auch emotionale Aspekte. Zwar sind die Vorstellungen, die Schüler mitbringen, meist nicht mit einer wissenschaftlichen Vorstellung kompatibel, das macht sie aber nicht vollkommen falsch. Ihre Vorstellungen sind ja aus Alltagserfahrungen entstanden und haben sich in vielen Situationen bewährt. Folglich kann nicht erwartet werden, dass diese Vorstellungen einfach aufgegeben werden. Es ist vielmehr ein langer Überzeugungsprozess notwendig. Die Schwierigkeit, gewohnte Vorstellungen aufzugeben, wird auch in der Geschichte der physikalischen Forschung selbst deutlich⁶ [Dui09].

Der Wechsel von einem Konzept (den Alltagsvorstellungen) zum anderen (den physikalischen Sichtweisen) ist also ein schwieriger Prozess. Theorien dazu, die diesen Prozess erleichtern, gibt es schon seit den 1980er-Jahren [WSH17]. Es wird davon ausgegangen, dass es für einen erfolgreichen Konzeptwechsel vier Bedingungen gibt:

- Es muss Unzufriedenheit mit den gewohnten Vorstellungen geben [Dui09].
- Die angebotene neue Vorstellung muss logisch verständlich sein [Dui09].
- Die neue Vorstellung muss einleuchtend (also intuitiv und plausibel) sein [Dui09].
- Die neue Vorstellung muss fruchtbar sein, mit ihr sollen sich also neue Probleme, oder Probleme, bei denen die alten Vorstellungen versagten, lösen lassen können [Dui09]⁷.

Je nachdem um was für eine Schülervorstellung es sich handelt, sollen diese Punkte in einer der nachfolgend aufgelisteten Konzeptwechselstrategien umgesetzt werden [WSH17].

- Anknüpfungsstrategie: Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Schüler nützliche Vorstellungen mitbringen, auf denen aufbauend physikalisches Verständnis vermittelt werden kann. Zum Beispiel kann die Vorstellung, dass eine Einwirkung auf ein Objekt zu einer Änderung dessen Verhaltens führt, verwendet werden um die Grundidee der Newton’schen Mechanik einzuführen [WSH17][WWWTRH16].
- Konfrontationsstrategie: Die Lehrkraft sammelt die Vorstellungen der Schüler, die anschließend einander gegenübergestellt und diskutiert werden, um Widersprüche deutlich zu machen. Somit soll ein kognitiver Konflikt hervorgerufen werden mit dem

⁶Auch hier ist der Wechsel von der klassischen Mechanik und der Äthertheorie zur Relativitätstheorie ein gutes (und sicher das im Unterricht am ausführlichsten behandelte) Beispiel.

⁷Die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie erfüllt diese Bedingungen nicht ganz: Zwar war Unzufriedenheit mit der klassischen Theorie aufgrund experimenteller Befunde vorhanden und die neue Theorie war logisch und verständlich, jedoch war sie definitiv nicht einleuchtend. Dies wird demnach auch für jeden, der die Theorie lernt, ein Hindernis sein [DSWH18]

Ziel, dass die Schüler die physikalische Sichtweise als die angemessene akzeptieren [WSH17]

- Umdeutungsstrategie: Den Lernenden wird vermittelt, dass ihre Vorstellung nicht völlig falsch ist, sondern eine physikalisch sinnvolle Bedeutung enthält, die durch eine Umdeutung nur verfeinert werden muss. Dadurch soll die Bereitschaft zum Konzeptwechsel erhöht werden [WSH17]. Beispielsweise wird in den „Open Source Tutorials“ [6], die an der Universität Maryland entwickelt wurden, die Alltagsvorstellung, dass Körper umso schwerer aufzuhalten sind, je „stärker“ sie sind, verwendet um die physikalische Größe Impuls einzuführen.
- Brückenstrategie: Um den Übergang zu einer physikalisch anschlussfähigen Vorstellung zu erleichtern, werden Zwischenbegriffe eingeführt, die nach und nach bis zum Zielbegriff weiterentwickelt werden [WSH17].

Die Konfrontationsstrategie stellt einen diskontinuierlichen Weg dar, bei dem bewusst ein kognitiver Konflikt herbeigeführt wird. In diesem Fall ist es wichtig, dass die Schüler diesen Konflikt auch tatsächlich als solchen wahrnehmen⁸. Die anderen Methoden versuchen hingegen einen kontinuierlichen Weg von den Alltagsvorstellungen zu den wissenschaftlichen Vorstellungen zu gehen [Dui09].

2.2. Schülervorstellungen zur speziellen Relativitätstheorie

Die bisher behandelten Grundlagen machen die Bedeutung von Schülervorstellungen für den Physikunterricht deutlich. Dementsprechend sollte zu jedem Thema der Schulphysik eine solide Basis an erforschten Schülervorstellungen vorliegen, damit die Gestaltung effektiven Unterrichts ermöglicht werden kann. Für viele Themen gibt es auch bereits zahlreiche gut erforschte Vorstellungen, und auch Vorschläge, wie mit diesen umzugehen ist. Ein umfassender Überblick über die meisten Ergebnisse findet sich in [DSWH18]. Bei einer Auflistung der Anzahl der zu verschiedenen Themenbereichen durchgeführten Untersuchungen zu Schülervorstellungen lag die spezielle Relativitätstheorie mit nur drei Arbeiten jedoch klar auf dem letzten Platz [Dui11]. Auch Wittmann schreibt in seiner Dissertation, dass es trotz langer Suche und zahlreicher Gespräche mit Experten kaum möglich war, Veröffentlichungen zu finden [Wit12]. Die wenigen besser erforschten Schülervorstellungen finden sich in [DSWH18].

- **Es gibt einen absoluten Raum, absolute Längen und eine absolute Zeit:** Da Schülererfahrungen auf Vorerfahrungen (und somit hauptsächlich Alltagserfahrungen) basieren, ist diese Vorstellung nicht überraschend⁹. Die Tatsache, dass diese Vorstellung inadäquat ist, um das Universum physikalisch zu beschreiben, stellt eine fundamentale Umwälzung im Weltbild dar. Es ist offenbar auch so, dass es Schülern

⁸Dies ist offenbar beim Übergang von der klassischen Mechanik zur speziellen Relativitätstheorie nicht der Fall, siehe Abschnitt 2.2.

⁹Schließlich war es auch historisch für alle Forschenden ein schwieriger Konzeptwechsel.

hier Schwierigkeiten bereitet, wenn das Relativitätsprinzip konsequent angewandt wird. Wenn verschiedene Beobachter z. B. aufgrund der Relativität der Gleichzeitigkeit zu verschiedenen Beobachtungen gelangen, dann wollen die Schüler wissen, was tatsächlich passiert ist, bzw. welche der Beobachtung stimmt. Hier stößt wohl die Tatsache, dass beide Beobachtungen richtig sind auf Widerstand [DSWH18].

- **Relativistische Effekte sind optische Täuschungen:** Schüler argumentieren die verschiedenen Ergebnisse relativ zueinander bewegter Beobachter oft mit Messfehlern, Signallaufzeiten, optischen Täuschungen, oder Verzerrungen. Dies erlaubt es ihnen, diese Effekte in die Vorstellung einer Welt mit absolutem Raum und absoluter Zeit zu integrieren [DSWH18].
- Neben diesen beiden, vergleichsweise gut belegten, Vorstellungen gibt es auch Hinweise darauf, dass die meisten Schüler kein ausreichendes Verständnis der klassischen Physik besitzen, um den Wechsel zur speziellen Relativitätstheorie als fundamentalen Bruch zu erkennen. Da sie Schwierigkeiten mit den Galilei'schen Geschwindigkeitstransformationen haben, stellt es für sie oft kein Problem dar, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu akzeptieren. Wird diese jedoch anschließend auf bestimmte physikalische Situationen angewandt (z. B. die Herleitung der Zeitdilatation mittels einer Lichtuhr), so erkennen die Schüler sehr wohl einen Bruch mit dem klassischen Bild von Raum und Zeit (das auch den Alltagserfahrungen näher liegt), und akzeptieren diese Konsequenzen nicht [DSWH18].

Ein Überblick über mögliche Vorstellungen der Schüler¹⁰ und die Untersuchungen und Methoden, die zu diesen Ergebnissen geführt haben, findet sich in [Wit12]. Wie bereits beschrieben, ist die Liste kurz, und es ist anzumerken, dass nur zwei der behandelten Studien tatsächlich die Vorstellungen von Schülern erforschen. Die meisten Untersuchungen konzentrieren sich auf Studenten unterschiedlicher Semester und Studienrichtungen¹¹. Insbesondere die Ergebnisse, die direkt bei Schülern gefunden wurden, sind natürlich von besonderem Interesse, sodass sie hier zuerst aufgelistet werden.

- Der Erdboden wird meist als absolutes Bezugssystem betrachtet [Mac82].
- Eine Vorstellung von absolutem Raum, von absoluter Zeit und von absoluten Längen ist vorherrschend [Mac82].
- Es wird von Schülern oft angenommen, dass es einen Zustand absoluter Ruhe gibt [Mac82].
- Das Relativitätsprinzip ist offenbar nicht tief verankert, da verschiedene Inertialsysteme in manchen Situationen nicht als gleichwertig angesehen werden [Mac82].
- Als zentraler Punkt zur Beschreibung von Bewegungsvorgängen wird nicht die Relativbewegung verwendet [Mac82].

¹⁰Die jedoch teilweise noch nicht so gut erforscht sind.

¹¹z. B. Studierende des Lehramtsstudiums.

- Die meisten Befragten kennen die Geschwindigkeitstransformation nach Galilei für den Übergang zwischen Inertialsystem nicht [Mac82].
- Dennoch wird die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht konsequent angenommen, sondern ein Einfluss von Bewegung bzw. Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger auf die Lichtausbreitung angenommen [Mac82].
- Einige vermuten einen Widerspruch zwischen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der Relativität der Gleichzeitigkeit [Mac82].
- Es scheint zweckmäßig, einen überraschenden Effekt zum Einstieg zu benutzen, um zu vermitteln, dass eine neue Theorie notwendig ist [BDAG93].
- Schüler geben an, an der Relativitätstheorie interessiert zu sein [BDAG93].
- Schüler geben an, dass sich ihre Vorstellungen über die Realität durch die spezielle Relativitätstheorie tiefgreifend verändern [BDAG93].

Bei der Studie in [Mac82] wurden die Vorstellungen von Schülern der letzten Schuljahre von Gymnasien und Realschulen sowie von Studienanfängern im Lehramtsstudium untersucht. In [BDAG93] wurde ein speziell entwickeltes Curriculum für den Unterricht an einer italienischen Oberschule verwendet, und die Meinungen der Schüler zum Kurs wurden anschließend mithilfe eines Fragebogens erhoben. Insbesondere der zweite hier aufgelistete Punkt bestätigt sich auch in vielen empirischen Untersuchungen, wenn diese auch oft nicht mit Schülern durchgeführt werden [Wit12]. Die letzten drei Punkte sind weniger Schülervorstellungen, sondern eher Hinweise darauf, wie das Thema präsentiert werden kann. Interessant ist dabei vor allem, dass die Schüler selbst sehr wohl die Wahrnehmung haben, dass sich ihre Vorstellungen ändern. In weiteren Studien ergaben sich noch weitere, teilweise auch idente Punkte:

- Es wird von einem Zustand absoluter Bewegung ausgegangen [VP87].
- Eine absolute Sicht auf relativistische Effekte wird angenommen - Befragte unterscheiden zwischen „scheinbaren“ und „echten“ Ergebnissen [VP87].
- Studenten scheinen an der speziellen Relativitätstheorie interessiert zu sein [AV95].
- Studierende sehen die relativistischen Effekte als scheinbare Effekte an [AV95].
- Auch Studierende können das Konzept eines Bezugssystems nicht richtig verwenden und haben keine adäquate Vorstellung von Bezugssystemen [SSV01].
- Einige Studenten haben die Bedeutung von Begriffen wie „Ereignis“, „Bezugssystem“ und „Gleichzeitigkeit“ nicht verstanden und können diese nicht richtig verwenden [SSV02].
- Die Bedeutung der Relativität der Bezugssysteme wird nicht erfasst [Sel11].

- Ein mit der Erde verbundenes Bezugssystem wird als absolutes Bezugssystem gesehen [Sel11].
- Bei der Längenkontraktion wird eine Verkürzung in allen Dimensionen angenommen [Sel11].
- Viele Studierende haben inkorrekte Vorstellungen zur Masse¹² [Sel11].

Insbesondere ist bei diesem Überblick interessant, dass Studierende offenbar oft die gleichen Missverständnisse haben wie Schüler, auch wenn sie bereits Lehrveranstaltungen zur Relativitätstheorie besucht haben. Weiters ist interessant, dass Vorstellungen wie die von einem absoluten Bezugssystem (meist dem der Erde) oder absoluter Bewegung und Ruhe, nicht direkt Missverständnisse in Bezug auf die Relativitätstheorie sind. Diese Konzepte sind nämlich bereits im Rahmen der klassischen Physik als inadäquat anzusehen. Die klassische Mechanik ist demnach offenbar selbst bei Studenten nicht gut verinnerlicht, sodass darauf nur schlecht aufgebaut werden kann. Wittmann befragte in seiner Studie schließlich noch Schüler aus der 7. und 8. Schulstufe. Aus den durchgeführten Interviews ergaben sich folgende Einsichten:

- Die Vorstellungen der Schüler zum Relativitätsprinzip sind Großteils brauchbar [Wit12].
- Die Geschwindigkeitsaddition in der klassischen Physik wird von den meisten Schülern nicht beherrscht [Wit12].
- Wenn die klassische Geschwindigkeitsaddition richtig angewendet wird, so wird sie auch auf die Lichtgeschwindigkeit angewendet, wenn die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit vorher nicht bekannt ist [Wit12].
- Nur wenige sind von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht, ein Bruch zur klassischen Physik wird nicht erkannt [Wit12].
- Schüler verstehen Gleichzeitigkeit als absolut und formulieren das Messergebnis um, indem sie darüber sprechen, wann die Ereignisse geschehen sind [Wit12].
- Die meisten Schüler haben einen absoluten Zeitbegriff [Wit12].
- Die meisten Schüler haben die Vorstellung von absoluten Längen [Wit12].

¹²In [Sel11] wird berichtet, dass die Hälfte der Befragten die Masse als invariantes Konzept ansah, während die anderen eine mit der Geschwindigkeit anwachsende relativistische Masse erwähnten. Insbesondere unter den Anfängern schien das Konzept einer relativistischen Masse vorherrschend zu sein. Dies ist nicht überraschend, da dieses Konzept in zahlreichen Medien, wie z. B. Schulbüchern verwendet wird um die mit der Geschwindigkeit zunehmende Trägheit zu erklären. Die Masse ist jedoch ein Lorentzskalar und somit invariant unter Lorentz-Transformation. Die zunehmende Trägheit wird durch einen zusätzlichen Lorentzfaktor im Impuls beschrieben, der oft fälschlicherweise auf die Masse bezogen wird [Fli18]. Es ist demnach zu erwarten, dass diese Fehlvorstellung sehr oft vorliegt, da der Sachverhalt, meiner Erfahrung nach, auch im Studium nicht unbedingt korrekt präsentiert wird.

- Schüler nehmen ideale Messgeräte als Geräte, die Daten sammeln und nachher auswerten, und dabei Effekte der Lichtlaufzeit berücksichtigen und herausrechnen, gut an [Wit12].

Insbesondere interessant ist, dass bei den befragten Schülern in der gegebenen Situation offenbar keine Vorstellung von absoluter Bewegung vorhanden war. Da andere Studien solche Vorstellungen aber belegen, ist es denkbar, dass die Vorstellungen der Schüler dazu von der jeweils betrachteten Situation abhängen. Dafür spricht auch, dass Wittmann in seiner Arbeit bemerkt, dass er die Situationen bewusst so erstellt hatte, dass kein Bezug zum erdfesten System hergestellt werden kann [Wit12]. Weiters ist interessant, dass Schüler meist davon sprechen, dass zwei Ereignisse gleichzeitig stattgefunden haben, und nicht davon, dass ein Messgerät gemessen hat, dass sie gleichzeitig stattfinden. Diese beiden, in ihrer Aussage sehr verschiedenen, Formulierungen scheinen für die Schüler dieselbe Bedeutung zu haben. Die Schüler betrachten also offenbar Größen wie z.B. die Länge eines Objekts als deren unveränderliche Eigenschaft, und nicht als eine durch eine Messung festgelegte Größe. Eine etwas neuere Untersuchung, die folglich nicht in [Wit12] aufgelistet ist, haben Aslanides und Savage im Jahr 2013 durchgeführt. Dafür entwickelten sie einen „Relativity Concept Inventory“ und gaben ihn Schülern zur Bearbeitung der Aufgaben [AS13]. Mit dieser Untersuchung fanden sie Hinweise auf die folgenden Fehlvorstellungen:

- Einige Schüler nehmen an, dass sich die Zeitdilatation auf die Beobachtung von Objekten bezieht, jedoch nicht auf die Objekte selbst [AS13].
- Das Relativitätsprinzip wird nicht konsequent angewandt, was zu Asymmetrien führt. Schüler nehmen an, dass, wenn ein Beobachter A misst, dass die Uhr eines relativ dazu bewegten Beobachters B langsamer geht, B messen müsste, dass die Uhr von A schneller geht [AS13].

Die erste genannte Vorstellung ist wohl ähnlich einzuordnen wie die Annahme absoluter Längen. Schüler beantworteten zwar korrekt, dass ein Beobachter in einem Raumschiff misst, dass in einem relativ dazu bewegten Raumschiff die Zeit langsamer vergeht, aber sie erkannten nicht, dass dies bedeutet, dass ein Astronaut in einem Raumschiff, das sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegt die Galaxie während seiner Lebenszeit durchqueren könnte. Die dahinterliegende Vorstellung ist hierbei offenbar, dass selbst mit Lichtgeschwindigkeit eine Reise durch die Galaxie 100.000 Jahre dauert und der Astronaut ja nicht langsamer altern könnte, obwohl genau das aufgrund der Zeitdilatation passiert. Sie akzeptieren also das Messergebnis, beziehen es aber nicht auf die tatsächlichen zeitlichen Abläufe im Raumschiff. Die zweite Vorstellung macht insbesondere eine Betrachtung des Zwillingsparadoxons unmöglich. Wird die nach dem Relativitätsprinzip notwendige Symmetrie nicht erkannt, so kann das Problem des Symmetriebruchs in diesem Beispiel gar nicht vernünftig behandelt werden.

Im Folgenden sind aus den besprochenen Quellen abgeleitete Vorschläge für Schülervorstellungen

aufgelistet. Viele davon hängen eng zusammen und können möglicherweise vereint werden, eine größere Differenzierung scheint aber vorerst sinnvoll, um das Übersehen möglicher wichtiger Details zu vermeiden.

- **Es gibt einen absoluten Raum und eine absolute Zeit:** Diese, dem Alltag nahestehende, Vorstellung aus der klassischen Physik ist offenbar tief verankert. Demnach hängt der Raum nicht vom Beobachter und vom gewählten Bezugssystem ab. Weiters werden Raum und Zeit (wie in der klassischen Physik) als unabhängig voneinander betrachtet. Der von der speziellen Relativitätstheorie beschriebene Zusammenhang zwischen Raum und Zeit wird nicht erkannt.
- **Es gibt absolute Längen:** Diese Vorstellung ist eng mit der zuerst genannten verwandt. Sie ist hier jedoch getrennt aufgelistet, weil es doch feine Unterschiede gibt. Raum und Zeit werden einfach als die Gebilde betrachtet, in denen sich verschiedene Vorgänge abspielen. Insbesondere hängen sie nicht vom Beobachter ab. Die Länge von Objekten wird hingegen als Eigenschaft eines bestimmten Körpers angesehen. Dabei wird angenommen, dass der Körper diese Eigenschaft unabhängig von einer Messung besitzt, wohingegen in der physikalischen Denkweise die Länge erst durch eine Messung definiert ist. Dieses Konzept ist eigentlich auch schon Gegenstand der klassischen Physik, dort ergeben sich aufgrund des zugrundeliegenden Raum-Zeit-Konzepts daraus jedoch keine Widersprüche zur Alltagserfahrung.
- **Die Erde ist ein absolutes Bezugssystem:** Gibt es einen absoluten Raum und eine absolute Zeit, so ist es nicht völlig unvernünftig, auch ein absolutes Bezugssystem anzunehmen. Die Erde scheint, als der Ort, an dem wir leben, dafür eine logische Wahl zu sein. Es ist fraglich, inwiefern auch die Behandlung des Zwillingsparadoxons zu dieser Vorstellung beitragen kann. Wird nicht erkannt, dass es zu einem Symmetriebruch kommt, da der ins All reisende Zwilling umkehren muss und bei der Rückkehr zur Erde in das ursprüngliche Inertialsystem zurückkehrt, so könnte es sein, dass die Schüler annehmen, in seinem System sei die Zeit langsamer vergangen, weil er sich in einem bewegten System befindet, während die Erde das ruhende System ist. Dies könnte insbesondere dadurch begünstigt werden, dass bei vereinfachten Rechenbeispielen zum Zwillingsparadoxon die Beschleunigungsvorgänge außer Acht gelassen werden. Auch diese Fehlvorstellung kann bereits bei der klassischen Physik verortet werden.
- **Es gibt die Zustände absoluter Bewegung und absoluter Ruhe:** Diese Vorstellung liegt der Alltagserfahrung sehr nahe und führt auch in der klassischen Physik zu Verständnisschwierigkeiten. Bei der Behandlung der Vorstellung, dass sich Trägheit überwinden liese, wird in [DSWH18] bereits angesprochen, dass es für Schüler ein wesensmäßiger Unterschied ist, ob ein Körper ruht, oder in Bewegung ist. Insbesondere wird unter diesen Voraussetzungen nicht erkannt, dass die Relativbewegung das zentrale Merkmal zur Beschreibung von Bewegungsvorgängen ist.

- **Es gibt eine absolute Sicht auf relativistische Effekte:** Bei der Behandlung relativistischer Effekte fordern Schüler manchmal eine Erklärung ein, was wirklich passiert ist [DSWH18]. Diese Schüler nehmen offenbar an, dass es möglich ist, ein neutrales Urteil von „außerhalb“ über die Geschehnisse zu fällen. Dabei ist anzunehmen, dass sowohl eine Vorstellung von absolutem Raum, absoluter Zeit und absoluten Eigenschaften von Objekten eine Rolle spielen, als auch die eines absoluten Bezugssystems. Diese Schüler scheinen anzunehmen, dass sich zwar zwei relativ zueinander bewegte Beobachter nicht einigen könnten, was z. B. die tatsächliche Länge eines Stabes ist, es aber dennoch eine objektiv für alle richtige Länge gibt. Diese Vorstellung ist wohl eher eine Folge anderer Vorstellungen. Es ist anzunehmen, dass das Problem darin liegt, dass Schüler nicht akzeptieren wollen, dass zwei Beobachter zu verschiedenen Ergebnissen kommen, und beide bezogen auf ihr System stimmen. Dies könnte daran liegen, dass das einen Bruch zur klassischen Physik darstellt, die in diesem Punkt dem Alltagsverständnis sehr nahesteht.
- **Ein bewegter Körper ist in allen Dimensionen verkürzt:** Bei manchen besteht offenbar die Vorstellung, dass die Lorentzkontraktion auch quer zur Bewegungsrichtung auftritt. Es gibt einfache Argumente dagegen, eines davon wird bei der Analyse der Schulbücher in Kapitel 4 aufgegriffen.
- **Die Masse wächst mit der Geschwindigkeit:** Diese Fehlvorstellung kommt definitiv nicht aus Alltagsvorstellungen und ist viel mehr hausgemacht. Wie bereits in Fußnote 12 dargestellt, ist die Masse ein Lorentzskalar und hängt nicht von der Relativgeschwindigkeit ab. Die effektive Trägheit eines Körpers nimmt zwar tatsächlich mit wachsender Geschwindigkeit zu, das liegt jedoch nicht an der Masse. In vielen Lehrbüchern und anderen Medien hält sich jedoch hartnäckig die Vorstellung einer relativistischen Masse. Diese ist auch verständlich, da wir es aus der klassischen Physik gewohnt sind, die Trägheit direkt mit der Masse eines Objekts in Verbindung zu setzen. Diese Vorstellung überträgt sich aber nicht auf die Relativitätstheorie. Es ist daher notwendig dieses Konzept nicht im Unterricht einzuführen, sondern nur die divergierende Trägheit zu behandeln [Fli18].
- **Körper haben ihre Eigenschaften unabhängig von Messungen:** Mit diesem Konzept eng verwandt ist die Vorstellung von absoluten Längen, sie betrifft jedoch jede Größe, die nicht Lorentzinvariant ist. Das Problem ist, dass die Vorstellung nicht ausreichend verankert ist, dass die Eigenschaften, die einem Objekt zugeordnet werden, erst durch eine entsprechende Messvorschrift definiert sind. Daraus folgt, dass Schüler annehmen, dass zwar eine Messung ergibt, dass die Zeit in einem, relativ zum bewegten Messgerät Raumschiff, langsamer vergeht, dies jedoch keine Bedeutung für die im Raumschiff ablaufenden Vorgänge hat.
- **Mangelnde Kenntnis der klassischen Physik:** In vielen der hier aufgelisteten Vorstellungen wird deutlich, dass Konzepte aus der klassischen Physik nicht tiefgehend genug verankert sind, um den Bruch beim Übergang zur Relativitätstheorie

zu erkennen. Ist nicht klar, worum es sich bei einem Bezugssystem handelt, so können die meisten Betrachtungen zur Relativitätstheorie nicht nachvollzogen werden. Ist die klassische Geschwindigkeitstransformation nicht bekannt, so muss es nicht überraschend sein, dass jeder Beobachter für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum den gleichen Wert misst. Der Bruch der speziellen Relativitätstheorie zur klassischen Physik wird somit insbesondere bei den verschiedenen Annahmen nicht erkannt. Es ist jedoch so, dass der Bruch den Schülern bei den relativistischen Effekten sehr wohl klar wird, wobei hier die logische Stringenz offenbar fehlt, um die Effekte als Folgerungen aus den Annahmen (die auf experimentellen Ergebnissen beruhen) anzunehmen.

- **Relativistische Effekte sind asymmetrisch:** Es wird nicht erkannt, dass die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme bedeutet, dass jeder Beobachter das System, in dem er sich befindet, als ruhendes System betrachten, und ein anderes als bewegtes betrachten kann. Folglich messen zwei Beobachter, die sich in identischen Raumschiffen befinden, die sich aneinander vorbeibewegen, jeweils eine kürzere Länge für das andere Raumschiff, und beide Ergebnisse sind korrekt. Schüler nehmen jedoch an, dass einer messen müsste, dass das andere Raumschiff länger ist. Diese Vorstellung hängt wohl eng mit dem Verständnis des Relativitätsprinzips und einer Vorstellung von absoluten Eigenschaften von Objekten zusammen.
- **Relativistische Effekte sind scheinbare Effekte bzw. optische Täuschungen:** Schüler sprechen oft von „echten“ und „scheinbaren“ Werten und Ergebnissen. Verschiedene Messergebnisse werden mit einer verzerrten Messung (insbesondere des relativ zum zu messenden Objekt bewegten Beobachters) betrachtet. Es stellt sich die Frage, inwiefern hier ungeschickte Formulierungen in Lehrbüchern und Medien eine Rolle spielen könnten¹³.

2.3. Forschungsfrage

Das Ziel des Projekts ist es, eine Basis für die weitere Erforschung des Unterrichts zum Thema „Spezielle Relativitätstheorie“ und bestenfalls zur Entwicklung von Unterrichtskonzepten, die das konzeptuelle Verständnis fördern, zu legen. Aus der Darstellung des lernpsychologischen Hintergrunds in Abschnitt 2.1 ist klar, dass hierfür an das Vorwissen der Schüler angeknüpft und dieses somit bekannt sein muss. Insbesondere sind nach Abschnitt 2.1.2 die Schülervorstellungen von Bedeutung, die, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, zur speziellen Relativitätstheorie noch unzureichend erforscht sind. Insbesondere scheinen die konsequente und logisch stringente Anwendung des Relativitätsprinzips und

¹³Es finden sich oft Formulierungen wie „Ein bewegter Körper erscheint in Bewegungsrichtung verkürzt“, siehe z. B. [4], oder [Sex19]. Es ist zwar davon auszugehen, dass mit „erscheint“ in diesem Zusammenhang stets gemeint ist, dass ein Beobachter tatsächlich eine kürzere Länge misst und diese Länge aus dessen System heraus betrachtet somit auch tatsächlich kürzer ist, für Schüler ist dieses Wort jedoch sicherlich missverständlich und kann falsche Vorstellungen intensivieren, oder sogar induzieren. Auch bei der Annahme von Zuständen absoluter Ruhe und Bewegung können schlechte Formulierungen eine Rolle spielen, da oft nur von „ruhenden“ und „bewegten“ Beobachtern anstelle von relativ zu einem bestimmten Bezugssystem ruhenden und bewegten Beobachtern gesprochen wird.

der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und die daraus resultierenden Effekte den Schülern Schwierigkeiten zu bereiten. Deshalb scheint es notwendig, zunächst die Vorstellungen der Schüler zu den folgenden Punkten zu erheben:

- Relativitätsprinzip
- Geschwindigkeitstransformation und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
- Relativität der Gleichzeitigkeit
- Relativität des Raumes und der Längen

Um eine gute Grundlage für die weitere Forschung und Unterrichtsentwicklung zu schaffen, ist es weiters notwendig, zu erheben, wie sich der derzeitige Unterricht auf die Vorstellungen der Schüler auswirkt. Wie ändern sich die Vorstellungen? Welche werden beseitigt, bleiben stabil, oder werden sogar verstärkt? Gibt es Fehlvorstellungen, die durch den Unterricht erst generiert werden? Dazu ist auch zu beachten, wie Lehrtexte formuliert sind. Insgesamt lautet die Forschungsfrage zu diesem Projekt somit:

Welche Vorstellungen haben Schüler zu Raum, Zeit, Geschwindigkeit, Licht und Relativität vor und nach dem Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie?

Die Gestaltung der empirischen Untersuchung zu dieser Forschungsfrage orientiert sich dabei an den zuvor aufgelisteten Punkten, deren Erforschung für die Entwicklung effektiver Unterrichtskonzepte unverzichtbar sein dürfte.

3. Fachlicher Hintergrund

In diesem Abschnitt sollen die für die didaktische Untersuchung relevanten physikalischen Grundlagen dargestellt werden. Dabei folgen wir Ideen aus [3] und [Fli20].

3.1. Maxwell-Gleichungen und Galilei-Transformation

Häufig wird die Lorentztransformation als das Herzstück der speziellen Relativitätstheorie bezeichnet¹⁴. Wie wir in Kapitel 4 noch sehen werden, ist diese Aussage durch die Behandlung des Themas in den Schulbüchern, und somit (wahrscheinlich) auch für die Schüler, kaum nachvollziehbar. Vor dem historischen Hintergrund der Entstehung der Relativitätstheorie ändert sich das jedoch. Bevor Albert Einstein im Jahr 1905 die spezielle Relativitätstheorie im Werk „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ [Ein05] veröffentlichte wurde die Galilei-Transformation als die korrekte Beschreibung für Koordinatentransformationen zwischen relativ zueinander bewegten Inertialsystemen angesehen. Somit galten Gleichungen, die invariant unter Galilei-Transformation waren, als fundamentale Naturgesetze, da sie in allen Inertialsystemen die gleiche Form haben. Insbesondere sind die Newton’schen Axiome, die Grundlage der klassischen Mechanik, invariant unter Galilei-Transformation, die Maxwell-Gleichungen, die Grundlage der Elektrodynamik, jedoch nicht. Wir betrachten letzteren Punkt, der sich als das Tor zur speziellen Relativitätstheorie herausstellen wird, nun genauer.

Im Folgenden wird die Kenntnis der klassischen Mechanik (insbesondere des Begriffs „Inertialsystem“) sowie der Elektrodynamik vorausgesetzt. Wir betrachten zwei Inertialsysteme S und S' . System S' bewege sich relativ zu S in Richtung der x -Achse mit konstanter Geschwindigkeit v . Zum Zeitpunkt $t = t' = 0$ mögen der Ursprung von S und S' sowie deren Achsen zusammenfallen. In diesem Fall lautet die in der klassischen Mechanik verwendete Galilei-Transformation für die Umrechnung der Koordinaten von S nach S'

$$x' = x - v \cdot t \quad (3.1)$$

$$y' = y \quad (3.2)$$

$$z' = z \quad (3.3)$$

$$t' = t. \quad (3.4)$$

Mit dieser Transformation kann nun, unter anderem, untersucht werden, welche Geschwindigkeit ein Beobachter in S für ein Teilchen in S' messen würde. Wir betrachten ein Teilchen, dass sich in S' in Richtung der x' -Achse mit der Geschwindigkeit $\frac{dx'}{dt'} = u$ bewegt. Ein Beobachter im System S misst für dieses Teilchen die Geschwindigkeit

¹⁴Siehe z. B. die Darstellung auf der Website von Franz Embacher [2], oder das Schulbuch „big bang 8“ von Martin Apolin [Apo19]

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(x' + v \cdot t') = \frac{dx'}{dt'} + v \cdot \frac{dt'}{dt} = u + v, \quad (3.5)$$

wobei der zweite Schritt aufgrund von (3.4) möglich ist. Dies drückt die uns aus dem Alltag bekannte Transformation von Geschwindigkeiten aus. Fährt ein Zug mit 50 km/h an einem Beobachter auf dem Bahnsteig vorbei und bewegt sich ein Passagier im Zug mit 4 km/h in Fahrtrichtung, so würde man erwarten, dass der Beobachter am Bahnsteig für diesen Passagier eine Geschwindigkeit von 54 km/h misst. Genau das wäre auch das Ergebnis, würde die Geschwindigkeit wie in (3.5) transformiert werden. Wie sich in Kapitel 6 noch zeigen wird, ist diese Vorstellung offenbar auch für Schüler natürlich. Die eben verwendete Transformation kann auch für einen Lichtstrahl, der zur Zeit $t = t' = 0$ vom Ursprung von S und S' in x -Richtung ausgesandt wird, verwendet werden. In S' bewege sich das Licht mit der Geschwindigkeit $\frac{dx'}{dt'} = c$, wobei x , bzw. x' jeweils die Position der Wellenfront angeben. Die Transformation ergibt dann für die im System S gemessene Geschwindigkeit der Lichtfront

$$\frac{dx}{dt} = c + v. \quad (3.6)$$

Auch diese Aussage deckt sich meist mit den Erwartungen der Schüler (siehe Kapitel 6). Experimentell wurde jedoch in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts überraschenderweise festgestellt, dass sich Licht in jedem Inertialsystem unabhängig von der relativen Bewegung dieser zueinander mit der Geschwindigkeit

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.7)$$

ausbreitet. Dieses Ergebnis, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, legt also nahe, dass die Geschwindigkeitsaddition (3.5) nicht allgemein gültig ist. Die Lichtgeschwindigkeit c ist auch in den Maxwell-Gleichungen eine Konstante, und es ergibt sich aus den Maxwell-Gleichungen, dass sich eine elektromagnetische Wellenfront immer mit der Geschwindigkeit c ausbreitet. Um diesen Zusammenhang tiefergehend zu verstehen, müssen wir die Maxwell-Gleichungen in Bezug zur Galilei-Transformation untersuchen. Dazu betrachten wir zunächst die Vakuum-Maxwell-Gleichungen

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0. \quad (3.11)$$

Wir wenden nun erneut den Nabla-Operator auf (3.10) an und erhalten für die linke Seite

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = \underbrace{(\vec{\nabla} \cdot \vec{E})}_{=0} \cdot \vec{\nabla} - (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{E} = -\Delta \vec{E}, \quad (3.12)$$

wobei wir im letzten Schritt (3.8) und den Laplace-Operator $\Delta := \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}$ verwendet haben. Die rechte Seite ergibt

$$\vec{\nabla} \times \left(-\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (3.13)$$

unter Verwendung von (3.9) im letzten Schritt. Insgesamt ergibt sich somit die sogenannte Wellengleichung

$$\square \vec{E} = \Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (3.14)$$

mit dem d'Alembert-Operator $\square = \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$. Wir können nun die Form von (3.14) unter Galilei-Transformation untersuchen. Da die Wellengleichung für jede räumliche Dimension gleich aussieht, reicht es, anzunehmen, dass das $\vec{E}$ -Feld nur eine Komponente in x -Richtung hat, also $E_x(x, t) = E_x(x' + v \cdot t', t')$ zu betrachten. Wir betrachten nun die Ableitung des elektrischen Feldes nach x unter Verwendung der Galilei-Transformation (3.1-3.4)

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\partial E_x}{\partial x'} \underbrace{\frac{\partial x'}{\partial x}}_{=1} + \frac{\partial E_x}{\partial t'} \underbrace{\frac{\partial t'}{\partial x}}_{=0} = \frac{\partial E_x}{\partial x'}, \quad (3.15)$$

woraus wir sofort

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E_x}{\partial x'^2} \quad (3.16)$$

folgern können. Die Ableitung des elektrischen Feldes nach der x -Koordinate ist also invariant unter Galilei-Transformation. Es folgt auch sofort $\Delta \vec{E} = \Delta' \vec{E}$ für den dreidimensionalen Fall. Die Ableitung nach der Zeit ergibt jedoch

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t} + \frac{\partial E_x}{\partial t'} \underbrace{\frac{\partial t'}{\partial t}}_{=1} = -v \frac{\partial E_x}{\partial x'} + \frac{\partial E_x}{\partial t'}, \quad (3.17)$$

sie ist also nicht invariant unter Galilei-Transformation. Daraus folgt

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} &= -v \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_x}{\partial x'} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_x}{\partial t'} = \\
&= -v \frac{\partial}{\partial x'} \left(-v \frac{\partial E_x}{\partial x'} + \frac{\partial E_x}{\partial t'} \right) + \frac{\partial}{\partial t'} \left(-v \frac{\partial E_x}{\partial x'} + \frac{\partial E_x}{\partial t'} \right) = \\
&= v^2 \frac{\partial^2 E_x}{\partial x'^2} - 2v \frac{\partial^2 E_x}{\partial x' \partial t'} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial t'^2} = \left(\frac{\partial}{\partial t'} - v \frac{\partial}{\partial x'} \right)^2 E_x.
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Insgesamt ergibt sich somit für die Wellengleichung (3.14) unter Galilei-Transformation im System S'

$$\Delta' \vec{E} - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial t'^2} - v \vec{\nabla} \right) \vec{E} = 0, \tag{3.19}$$

also eine ganz andere Form als in S . Wie zuvor gezeigt, folgt die Wellengleichung direkt aus den Maxwellgleichungen. Da nun die Wellengleichung nicht invariant unter Galilei-Transformation in dem beschriebenen einfachen Spezialfall ist, ist sie erst recht nicht invariant unter allgemeinen Galilei-Transformationen. Somit können aber auch die Maxwell-Gleichungen nicht invariant unter Galilei-Transformation sein.

Aus den bisherigen Betrachtungen über die experimentell widerlegte Geschwindigkeitsaddition und die nicht gegebene Galilei-Invarianz der Maxwell-Gleichungen bzw. der Wellengleichung ergeben sich drei Möglichkeiten:

- 1) Die Maxwell-Gleichungen sind falsch.
- 2) Die Galilei-Transformation ist falsch.
- 3) Im Bereich der Elektrodynamik sind nicht alle Inertialsysteme gleichwertig und die Maxwell-Gleichungen sind keine fundamentalen Naturgesetze nach Galilei's Relativitätsprinzip.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts gab es keine experimentellen Ergebnisse, die die erste Option untermauert hätten. Die zweite Option schien völlig undenkbar, da der Galilei-Transformation ein natürlich erscheinendes Verständnis von Raum und Zeit zugrunde liegt. Die dritte Option schien am vielversprechendsten, da es zum Beispiel für Wasserwellen sehr wohl ein ausgezeichnetes Inertialsystem gibt, was in Analogie auch für elektromagnetische Wellen hätte sein können. Aus diesem Grund begann die Suche nach dem Lichtäther, der jedoch äußerst eigenartige Eigenschaften hätte haben müssen. Die eben dargestellten Sachverhalte waren um die Jahrhundertwende keine große Neuheit mehr, wie der erste Satz von Albert Einsteins Werk „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ zeigt: „*Daß die Elektrodynamik Maxwells - wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt - in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhafte scheinen, ist bekannt.*“ [Ein05]. Da die Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führte, wurde vielfach behauptet, dass die Maxwell-Gleichungen nichtrelativistisch

seien. Einstein ging nun davon aus, dass, im Gegensatz dazu, die Galilei-Transformation falsch war und die Maxwell-Gleichungen sehr wohl als relativistisch anzusehen sind. Er blieb bei seinem Relativitätsprinzip dabei, dass alle Inertialsysteme gleichwertig sind (im Gegensatz zur viel verfolgten Option 3) und postulierte, dass nicht Newtons Axiome in allen Inertialsystemen gelten, sondern vielmehr die Maxwell-Gleichungen.

3.2. Die Lorentz-Transformation

Wir folgen nun Einsteins Weg, indem wir eine Transformation suchen, die die Wellengleichung (3.14) invariant lässt. Dabei sei angemerkt, dass die Lorentz-Transformation selbst nicht auf Einstein, sondern auf Hendrik Anton Lorentz zurückgeht, der diese jedoch im Rahmen der Äthertheorie (siehe voriger Abschnitt) verwendete. Zunächst schreiben wir die Wellengleichung zur Vereinfachung nicht mit dem vektoriellen $\vec{E}$ -Feld, sondern mit dem skalaren Feld $\Phi = \Phi(t, x, y, z)$ an. Dies ist möglich, da die Wellengleichung für jede Komponente gleich aussieht. Weiters führen wir die Kurzschreibweise

$$\partial_t := \frac{\partial}{\partial t} \quad (3.20)$$

ein. Die Wellengleichung lautet somit

$$-\frac{1}{c^2} \partial_t^2 \Phi + \Delta \Phi = 0. \quad (3.21)$$

Weiters betrachten wir nun statt der Koordinaten (t, x, y, z) die praktischeren Koordinaten (x^0, x^1, x^2, x^3) mit

$$x^0 = c \cdot t \quad (3.22)$$

$$x^1 = x \quad (3.23)$$

$$x^2 = y \quad (3.24)$$

$$x^3 = z. \quad (3.25)$$

Für die Ableitungen nach den räumlichen Koordinaten können wir dann ebenfalls die Kurzschreibweise

$$\partial_i := \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (3.26)$$

eingeführen, wobei die lateinischen Indizes von 1 bis 3 laufen, weshalb die Zeitkoordinate bei dieser Schreibweise nicht miteinfasst ist. Somit können wir auch den Laplace-Operator unter Verwendung des Kronecker-Delta umschreiben zu

$$\Delta = \sum_{i,j} \delta^{ij} \partial_i \partial_j = \delta^{ij} \partial_i \partial_j. \quad (3.27)$$

Hierbei haben wir die Einstein'sche Summenkonvention verwendet, die besagt, dass über gleiche Indizes, von denen einer oben und einer unten steht, summiert wird, auch wenn das Summenzeichen nicht angeschrieben wird. Da die Zeitkoordinate im neuen Koordinatensystem nicht direkt übernommen wurde, gilt für die Ableitung nach der x^0 -Koordinate

$$\partial_t = \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x^0} \frac{\partial x^0}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x^0} \frac{\partial}{\partial t} (c \cdot t) = \frac{\partial}{\partial x^0} c = c \frac{\partial}{\partial x^0} = c \partial_0. \quad (3.28)$$

Somit können wir die Wellengleichung in der praktischeren Form

$$\square \Phi = -\partial_0 \Phi + \delta^{ij} \partial_i \partial_j \Phi = -\partial_0 \Phi(x^\sigma) + \delta^{ij} \partial_i \partial_j \Phi(x^\sigma) = 0 \quad (3.29)$$

mit $\Phi(x^0, x^1, x^2, x^3) = \Phi(x^\sigma)$, wobei griechische Indizes von 0 bis 3 laufen, notieren. Die Wellengleichung lässt sich noch eleganter anschreiben, indem wir die Matrix η als

$$\eta := \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

definieren. Somit wird die Wellengleichung zu

$$\square \Phi(x^\sigma) = \eta^{\mu\nu} \partial_\mu \partial_\nu \Phi(x^\sigma) = 0. \quad (3.31)$$

Mit dieser einfachen Form können wir nun das Transformationsverhalten bei einer beliebigen Koordinatenänderung von x^σ zu $\bar{x}^\mu = \bar{x}^\mu(x^\sigma)$ untersuchen. Daraus folgt sofort

$$\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu} = \frac{\partial \bar{x}^\nu}{\partial x^\mu} \frac{\partial}{\partial \bar{x}^\nu} = \frac{\partial \bar{x}^\nu}{\partial x^\mu} \bar{\partial}_\nu. \quad (3.32)$$

Weiters wird angenommen, dass sich $\Phi(x^\sigma)$ wie eine skalare Funktion transformiert (d.h. $\bar{\Phi}(\bar{x}^\sigma) = \Phi(x^\sigma)$). Somit erhalten wir durch eine direkte Rechnung die Bedingung für eine Transformation, die die Wellengleichung invariant lässt

$$\begin{aligned}
\Box\Phi(x^\sigma) &= \eta^{\mu\nu}\partial_\mu\partial_\nu\Phi(x^\sigma) = \eta^{\mu\nu}\partial_\mu\left(\frac{\partial\bar{x}^\beta}{\partial x^\nu}\bar{\partial}_\beta\bar{\Phi}(\bar{x}^\sigma)\right) = \\
&= \eta^{\mu\nu}\frac{\partial\bar{x}^\beta}{\partial x^\nu}\partial_\mu\bar{\partial}_\beta\bar{\Phi}(\bar{x}^\sigma) + \eta^{\mu\nu}\frac{\partial^2\bar{x}^\beta}{\partial x^\mu\partial x^\nu}\bar{\partial}_\beta\bar{\Phi}(\bar{x}^\sigma) = \\
&= \eta^{\mu\nu}\frac{\partial\bar{x}^\alpha}{\partial x^\mu}\frac{\partial\bar{x}^\beta}{\partial x^\nu}\bar{\partial}_\alpha\bar{\partial}_\beta\bar{\Phi}(\bar{x}^\sigma) + \eta^{\mu\nu}\frac{\partial^2\bar{x}^\beta}{\partial x^\mu\partial x^\nu}\bar{\partial}_\beta\bar{\Phi}(\bar{x}^\sigma) \stackrel{!}{=} \\
&\stackrel{!}{=} \eta^{\alpha\beta}\bar{\partial}_\alpha\bar{\partial}_\beta\bar{\Phi}(\bar{x}^\sigma) = \bar{\Box}\bar{\Phi}(\bar{x}^\sigma).
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Dabei gilt die geforderte Gleichheit der vorletzten und letzten Zeile genau dann wenn das Koordinatensystem $(\bar{x}^0, \bar{x}^1, \bar{x}^2, \bar{x}^3)$ ein Inertialsystem ist. Damit erhalten wir für die Transformation die Bedingungen

$$\eta^{\mu\nu}\frac{\partial\bar{x}^\alpha}{\partial x^\mu}\frac{\partial\bar{x}^\beta}{\partial x^\nu} = \eta^{\alpha\beta} \tag{3.34}$$

$$\eta^{\mu\nu}\frac{\partial^2\bar{x}^\beta}{\partial x^\mu\partial x^\nu} = 0. \tag{3.35}$$

Daraus kann gefolgert werden, dass

$$\frac{\partial\bar{x}^\mu}{\partial x^\nu} = \text{const} \tag{3.36}$$

gelten und die Transformation somit linear sein muss. Das ist auch aus physikalischer Sicht klar, denn eine nichtlineare Transformation wäre nicht an jedem Ort und jedem Tag gleich. Das wäre aber mit der Homogenität von Raum und Zeit nicht vereinbar. Es gibt noch zahlreiche andere Möglichkeiten die Notwendigkeit der Linearität der Transformation zu begründen. Es seien hier drei Beispiele erwähnt:

- In [Rin06] wird das Argument verwendet, dass das Verhältnis der Raten, in denen eine ruhende Uhr im System S und eine relativ dazu mit konstanter Geschwindigkeit bewegte Uhr ticken, aufgrund der Homogenität des Raumes und der Zeit sowie des ersten Newton'schen Gesetzes, konstant sein muss. Dies gilt ebenso für die bewegte Uhr und ein relativ zu S bewegtes Inertialsystem S' , woraus leicht gezeigt werden kann, dass die Transformation von S zu S' linear sein muss.
- Eine einfache qualitative Begründung ist, dass in allen Inertialsystemen das Inertialgesetz gilt, weshalb geradlinig-gleichförmige Bewegungen beim Wechsel in ein anderes System mittels der Transformation wieder auf geradlinig-gleichförmige Bewegungen abgebildet werden müssen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Transformation linear ist [Emb10].
- Von Ignatowski stammt der Beweis, dass die Linearität und sogar die Struktur der Transformationen zwischen Inertialsystemen direkt aus der Gleichwertigkeit aller

Inertialsysteme und der Voraussetzung, dass diese eine Gruppe bilden müssen, abgeleitet werden kann. Näheres dazu findet sich in [PT15].

Wir definieren nun die Transformationsmatrix $\Lambda = (\Lambda_\nu^\mu)$ über

$$\Lambda_\nu^\mu := \frac{\partial \bar{x}^\mu}{\partial x^\nu} = \text{const}, \quad (3.37)$$

womit wir die Transformation mittels

$$\bar{x}^\mu = \Lambda_\nu^\mu x^\nu + \bar{a}^\mu \quad (3.38)$$

darstellen können. Den konstanten Vektor $\bar{a}^\mu$ können wir dabei unterdrücken. Damit ergibt sich als Bedingung für die Transformation

$$\eta^{\mu\nu} \Lambda_\mu^\alpha \Lambda_\nu^\beta = \eta^{\alpha\beta}, \quad (3.39)$$

die wir auch als Matrixmultiplikation anschreiben können

$$\Lambda^T \eta \Lambda = \eta. \quad (3.40)$$

Die Matrizen, die diese Eigenschaften erfüllen, sind symmetrisch, da auch η symmetrisch ist. Folglich sind 6 Gleichungen überflüssig, sodass es 6 Parameter gibt. Die Lösung umfasst unter anderem die Drehungen im dreidimensionalen Raum, die wir hier nicht näher betrachten wollen, da sie keine neuen Erkenntnisse gegenüber der klassischen Physik bringen. Dadurch sind mit den drei Drehwinkeln bereits drei Parameter geklärt. Für die weiteren drei Parameter betrachten wir als Ansatz drei Matrizen, die abgesehen von einem 2×2 -Block trivial sind

$$\begin{pmatrix} \Lambda_0^0 & \Lambda_1^0 & 0 & 0 \\ \Lambda_0^1 & \Lambda_1^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \Lambda_0^0 & 0 & \Lambda_2^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \Lambda_0^2 & 0 & \Lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \Lambda_0^0 & 0 & 0 & \Lambda_3^0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Lambda_0^3 & 0 & 0 & \Lambda_3^3 \end{pmatrix}. \quad (3.41)$$

Wir greifen dabei die erste Matrix heraus und betrachten nur den nichttrivialen Block

$$\Lambda' = \begin{pmatrix} \Lambda_0^0 & \Lambda_1^0 \\ \Lambda_0^1 & \Lambda_1^1 \end{pmatrix}. \quad (3.42)$$

Für die anderen beiden Matrizen sind die folgenden Schritte identisch, weshalb die Be-

handlung dieses Falls ausreichend ist. Die Bedingung (3.40) ergibt nun

$$\begin{aligned}\Lambda'^T \eta \Lambda' &= \begin{pmatrix} \Lambda_0^0 & \Lambda_0^1 \\ \Lambda_1^0 & \Lambda_1^1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Lambda_0^0 & \Lambda_1^0 \\ \Lambda_0^1 & \Lambda_1^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\Leftrightarrow \begin{pmatrix} -(\Lambda_0^0)^2 + (\Lambda_0^1)^2 & -\Lambda_0^0 \Lambda_1^0 + \Lambda_0^1 \Lambda_1^1 \\ -\Lambda_0^0 \Lambda_1^0 + \Lambda_0^1 \Lambda_1^1 & -(\Lambda_1^0)^2 + (\Lambda_1^1)^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Aus

$$\begin{aligned}-(\Lambda_0^0)^2 + (\Lambda_0^1)^2 &= -1 \\ \Leftrightarrow (\Lambda_0^0)^2 - (\Lambda_0^1)^2 &= 1 \end{aligned} \quad (3.44)$$

können wir folgern, dass es ein reelles Ψ gibt, sodass

$$\Lambda_0^0 = \cosh \Psi \quad (3.45)$$

$$\Lambda_0^1 = -\sinh \Psi \quad (3.46)$$

gelten. Dabei wählen wir $\Lambda_0^0 > 0$, weil wir Lorentztransformationen betrachten wollen, die die Richtung der Zeit nicht ändern, und wählen das negative Vorzeichen für Λ_0^1 aus praktischen Gründen. Analog erhalten wir aus

$$-(\Lambda_1^0)^2 + (\Lambda_1^1)^2 = 0, \quad (3.47)$$

dass es ein $\varphi \in \mathbb{R}$ geben muss, sodass die Beziehungen

$$\Lambda_1^0 = -\sinh \varphi \quad (3.48)$$

$$\Lambda_1^1 = \cosh \varphi \quad (3.49)$$

gelten. Dabei bedeutet die Wahl von $\Lambda_1^1 > 0$, dass wir Raumspiegelungen nicht berücksichtigen. Setzen wir (3.45)-(3.48) in die letzte Bedingung ein, so ergibt sich

$$-\Lambda_0^0 \Lambda_1^0 + \Lambda_0^1 \Lambda_1^1 = \cosh \Psi \sinh \varphi - \sinh \Psi \cosh \varphi = \sinh(\varphi - \Psi) \stackrel{!}{=} 0, \quad (3.50)$$

woraus sofort $\varphi = \Psi$ folgt. Somit ist die Lorentztransformation durch die Matrix

$$\Lambda' = \begin{pmatrix} \cosh \Psi & -\sinh \Psi \\ -\sinh \Psi & \cosh \Psi \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

gegeben. Im einfachen Spezialfall, dass die Achsen und Ursprünge von S und S' zur Zeit $t = t' = 0$ zusammenfallen und sich S' relativ zu S mit konstanter Geschwindigkeit v in x -Richtung bewegt, ist die gesamte Koordinatentransformation bereits durch (3.51) gegeben (analog für Bewegung in y -, oder z -Richtung). Wir können nun noch die Bedeutung des Parameters Ψ und der Relativgeschwindigkeit v bei der Lorentztransformation klären. Bei Berechnung der $x^{1'}$ -Koordinate eines in S' ruhenden Massenpunktes im beschriebenen Spezialfall gilt

$$x^{1'} = -\sinh \Psi \cdot x^0 + \cosh \Psi \cdot x^1 = -c \cdot \sinh \Psi \cdot t + \cosh \Psi \cdot x^1. \quad (3.52)$$

Daraus folgt unmittelbar

$$x^1 = \text{const} + \underbrace{c \cdot \tanh \Psi}_{=v} \cdot t, \quad (3.53)$$

da sich der Massenpunkt relativ zu S mit konstanter Geschwindigkeit v bewegt und der erste Term (x^1 -Koordinate zur Zeit $t = t' = 0$) dazu keinen Beitrag leisten kann. Es gilt also der Zusammenhang

$$\Psi = \operatorname{artanh} \frac{v}{c} \quad (3.54)$$

zwischen der sogenannten Rapidity Ψ und der Relativgeschwindigkeit v . Für Relativbewegungen, die nicht ausschließlich in x -Richtung erfolgen, erhält man für die anderen beiden Matrizen in (3.41) Rapiditäten, die mit den Geschwindigkeitsanteilen in diese Richtungen zusammenhängen, sodass die drei gesuchten Parameter die Anteile der Relativgeschwindigkeit in die drei Achsenrichtungen, also v_x, v_y, v_z sind. Die spezielle Lorentztransformation kann auch wieder mit ct' statt x^0 angeschrieben werden und lautet dann

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \Psi & -\sinh \Psi \\ -\sinh \Psi & \cosh \Psi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}. \quad (3.55)$$

Um den Zusammenhang zwischen Raum, Zeit und Relativgeschwindigkeit deutlicher zu machen, führen wir noch den Lorentzfaktor

$$\gamma = \cosh \Psi = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.56)$$

ein, womit wir auch

$$\sinh \Psi = \gamma \frac{v}{c} \quad (3.57)$$

erhalten. So können wir die spezielle Lorentztransformation umschreiben zu

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma \frac{v}{c} \\ -\gamma \frac{v}{c} & \gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}. \quad (3.58)$$

Wir können die spezielle Lorentztransformation auch ausführlicher, in der Form

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.59)$$

$$y' = y \quad (3.60)$$

$$z' = z \quad (3.61)$$

$$ct' = \frac{ct - \frac{v}{c}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.62)$$

anschreiben, was insbesondere in der Schule üblich ist, da dort keine Matrizen zur Verfügung stehen. Weiters wird in der Schule meist die Koordinate t anstelle von $x^0 = ct$ verwendet, womit sich (3.62) zu

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.63)$$

ändert. In dieser Form ist die Transformationsmatrix nicht mehr symmetrisch. Bei dieser Herleitung der Lorentztransformation, der nur die Annahmen zugrunde liegen, dass die Maxwell-Gleichungen in allen Inertialsystemen gelten und dass alle Inertialsysteme gleichwertig sind, wird ihre zentrale Bedeutung klar sichtbar. Leider stehen in der Schule jedoch die mathematischen Methoden dafür bei Weitem nicht zur Verfügung, und selbst wenn es so wäre, müsste angenommen werden, dass nur sehr wenige Schüler dem Rechengang folgen und dabei die dahinterliegende Physik begreifen könnten. Als Hintergrundwissen für die Lehrkraft ist die zentrale Stellung der Lorentztransformation für die spezielle Relativitätstheorie jedoch unabdingbar, da sonst nicht erwartet werden kann, dass es ihr gelingt, Schülern zu vermitteln, dass das zentrale Thema der Theorie die Umrechnung von Koordinaten zwischen Inertialsystemen ist.

Zum Schluss sei noch angemerkt, dass für $v \ll c$ offenbar

$$\gamma \approx 1 \quad (3.64)$$

gilt. Somit reduzieren sich (3.59) und (3.63) im Fall kleiner Geschwindigkeiten zu

$$x' \approx x - vt \quad (3.65)$$

$$t' \approx t, \quad (3.66)$$

sodass wir näherungsweise wieder die Galilei-Transformation verwenden können. Das erklärt auch, weshalb die Galilei-Transformation und die Schlussfolgerungen aus dieser, wie z. B. die Geschwindigkeitsaddition (3.5) uns so natürlich erscheinen: Bei alltäglichen Geschwindigkeiten ergeben sich im Rahmen der Messgenauigkeit genau diese Resultate. Da die Unterschiede erst bei recht hohen Geschwindigkeiten deutlich werden, scheinen somit die Lorentztransformation und die aus ihr abgeleiteten Effekte zunächst unglaublich, sind aber experimentell gut bestätigt.

3.3. Relativistische Effekte

Zuletzt wollen wir noch die für die Studie relevanten relativistischen Effekte aus der Lorentztransformation ableiten. Wir werden uns bei der Besprechung der Interviewfragen auf diese Grundlagen berufen.

Für diese Diskussion ist es von besonderer Bedeutung, sich zu vergegenwärtigen, dass eine Länge, oder eine Zeitdauer über die jeweiligen Messungen festgelegt sind. Die Frage danach, was Zeit und Länge sind, kann also nur im Sinne der Frage, was eine Längen- oder Zeitmessung ergibt beantwortet werden. Dies ist auch in der klassischen Physik schon so, gerät jedoch oft in den Hintergrund, da die Anwendung der Galilei-Transformationen (3.1)-(3.4) nicht zu kontraintuitiven Ergebnissen bezüglich dieser Fragen führt. Die Lorentztransformationen (3.59)-(3.62) sind jedoch mit einer „naiven“ Alltagsvorstellung von Raum und Zeit nicht kompatibel, und ihre Anwendung führt somit zu überraschenden Resultaten.

3.3.1. Geschwindigkeitsaddition

Wie bereits in Abschnitt 3.1 besprochen ist die Geschwindigkeitsaddition (3.5) nicht allgemein gültig. Das ist nun auch klar, da diese aus der Galilei-Transformation folgt, die, außer im Fall $v \ll c$ keine korrekte Umrechnung zwischen Inertialsystemen liefert.

Betrachten wir als Beispiel zur Herleitung der korrekten Geschwindigkeitsaddition ein Raumschiff B (System S'), dass sich relativ zu Raumschiff A (System S) mit der Relativgeschwindigkeit v_1 in x -Richtung bewegt. Die Achsen und Ursprünge von S und S' mögen wiederum zur Zeit $t = t' = 0$ zusammenfallen. In diesem Fall können wir die spezielle

Lorentztransformation (3.58) verwenden. Es bewege sich nun ein Teilchen in Raumschiff B (System S') mit konstanter Geschwindigkeit ebenfalls in Richtung der x -Achse. Wir können dieses Teilchen im Rahmen eines mitbewegten Inertialsystems S'' betrachten, dessen Achsen und Ursprung zur Zeit $t = t' = t'' = 0$ ebenfalls mit jenen des Systems S' zusammenfallen, und das sich relativ zu S' mit der Geschwindigkeit v_2 bewegt. Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich das System S'' und somit das Teilchen relativ zum System S (Raumschiff A)? Die Antwort finden wir, indem wir zwei Lorentztransformationen hintereinander ausführen, und zwar von S zu S' und von S' zu S'' . Dies ist möglich, da die Lorentztransformationen eine Gruppe bezüglich der Hintereinanderausführung bilden, sodass zwei nacheinander ausgeführte Lorentztransformationen wieder eine Lorentztransformation ergeben. Die Berechnungen vereinfachen sich wesentlich, wenn wir die Rapiditäten

$$\Psi_1 = \operatorname{artanh} \frac{v_1}{c} \quad (3.67)$$

$$\Psi_2 = \operatorname{artanh} \frac{v_2}{c}, \quad (3.68)$$

sowie die Form (3.55) der Lorentztransformation verwenden. Somit ergibt sich bei Hintereinanderausführung, um die gesamte Rapidität Ψ zu finden,

$$\begin{aligned} \Lambda(\Psi) &= \Lambda(\Psi_2) \cdot \Lambda(\Psi_1) = \begin{pmatrix} \cosh \Psi_2 & -\sinh \Psi_2 \\ -\sinh \Psi_2 & \cosh \Psi_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cosh \Psi_1 & -\sinh \Psi_1 \\ -\sinh \Psi_1 & \cosh \Psi_1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cosh \Psi_2 \cosh \Psi_1 + \sinh \Psi_2 \sinh \Psi_1 & -\cosh \Psi_2 \sinh \Psi_1 + \sinh \Psi_2 \cosh \Psi_1 \\ -\sinh \Psi_2 \cosh \Psi_1 + \cosh \Psi_2 \sinh \Psi_1 & \sinh \Psi_2 \sinh \Psi_1 + \cosh \Psi_2 \cosh \Psi_1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cosh(\Psi_1 + \Psi_2) & -\sinh(\Psi_1 + \Psi_2) \\ -\sinh(\Psi_1 + \Psi_2) & \cosh(\Psi_1 + \Psi_2) \end{pmatrix} = \Lambda(\Psi_1 + \Psi_2), \end{aligned} \quad (3.69)$$

also die elegante Lösung

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2. \quad (3.70)$$

Unter Lorentztransformation verhalten sich also die relativen Rapiditäten wie die Relativgeschwindigkeiten unter Galilei-Transformation. Dieses Ergebnis übersetzen wir nun noch zurück zu den Relativgeschwindigkeiten, um die Relativgeschwindigkeit v des Teilchens (System S'') zu Raumschiff A (System S) zu erhalten

$$\begin{aligned} v &= c \cdot \operatorname{artanh} \Psi = c \cdot \operatorname{artanh} \Psi_1 + \Psi_2 = c \cdot \frac{\tanh \Psi_1 + \tanh \Psi_2}{1 + \tanh \Psi_1 \cdot \tanh \Psi_2} = \\ &= c \cdot \frac{\frac{v_1}{c} + \frac{v_2}{c}}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}. \end{aligned} \quad (3.71)$$

Dabei haben wir ein Additionstheorem für den Areatangens hyperbolicus ausgenutzt. Es

lässt sich zeigen, dass durch Geschwindigkeitsaddition mit dem Geschwindigkeitsadditionstheorem (3.71) von beliebig vielen Geschwindigkeiten $v_i < c$, die außer dieser Beschränkung beliebig hoch sein dürfen, niemals eine Geschwindigkeit $v \geq c$ erreicht werden kann. Weiters können wir im Beispiel zur Herleitung das Teilchen durch ein zur Zeit $t = t' = 0$ vom Ursprung von S' (also in Raumschiff B) ausgesandtes Photon ersetzen, das sich in x -Richtung bewegt. Dabei bewegt es sich relativ zu S' mit Lichtgeschwindigkeit c . Die Geschwindigkeitsaddition ergibt nun für die in Raumschiff A gemessene Geschwindigkeit des Photons

$$v = \frac{v_1 + c}{1 + \frac{v_1 c}{c^2}} = \frac{c \cdot (\frac{v_1}{c} + 1)}{1 + \frac{v_1}{c}} = c. \quad (3.72)$$

Dies deckt sich mit den bereits in Abschnitt 3.1 erwähnten experimentellen Ergebnissen. Gleichung (3.72) ist einfach die mathematische Form des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, also der Aussage, dass für die Lichtgeschwindigkeit in jedem Inertialsystem der Wert $c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (3.7) gemessen wird, unabhängig von der Relativbewegung zwischen Lichtquelle und Messgerät¹⁵. Anzumerken ist hier, dass es sich dabei immer um die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum handelt. In Materie hat die Lichtgeschwindigkeit einen geringeren Wert, abhängig von den Eigenschaften des Materials.

3.3.2. Relativität der Gleichzeitigkeit

Der Galilei-Transformation liegt das Verständnis von absoluter Zeit zugrunde [Emb10]. Deshalb ist es auch nicht überraschend, dass Ereignisse, die in einem Inertialsystem gleichzeitig stattfinden, im Verständnis der klassischen Physik, auch in allen anderen Inertialsystemen gleichzeitig stattfinden. Ausgedrückt wird dies durch die Transformation der Zeitkoordinate $t' = t$ (bzw. bei Verschiebung des Nullpunkts $t' = t - t_0$) für beliebige Inertialsysteme S und S' in (3.4). Das Einstein'sche Relativitätsprinzip impliziert ein anderes Verständnis von Raum und Zeit, das in der Lorentztransformation zum Ausdruck kommt. Besonders einfach sieht man dies mit Gleichung (3.63) ein

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3.73)$$

Betrachten wir zwei Ereignisse die im System S gleichzeitig, aber an verschiedenen Orten stattfinden, also

¹⁵Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht aus Gleichung (3.72) folgt. Eine solche Aussage, die auch des Öfteren in Schulbüchern zu finden ist (siehe Kapitel 4), wäre ein Zirkelschluss, da das Additionstheorem für Geschwindigkeiten (3.71) eine Folgerung aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist.

$$t_1 = t_2 \quad (3.74)$$

$$x_1 \neq x_2. \quad (3.75)$$

Aus den Bedingungen (3.74) und (3.75), zusammen mit der Transformation der Zeitkoordinate ins relativ zu S mit der Geschwindigkeit v bewegte Inertialsystem S' (3.73), folgt, dass

$$t'_1 \neq t'_2 \quad (3.76)$$

gelten muss, da in die Berechnung von t'_1 und t'_2 sowohl die in S gleichen Zeitkoordinaten t_1 und t_2 , als auch die (ebenfalls in S) verschiedenen Ortskoordinaten x_1 und x_2 eingehen. Während ein Beobachter in S also misst, dass die beiden Ereignisse gleichzeitig stattfinden, wird ein Beobachter in S' feststellen, dass sie nacheinander passieren. Nachdem nun alle Inertialsysteme gleichberechtigt sind, kann keiner der Beobachter sagen, dass nur sein Ergebnis das richtige ist, und das des jeweils anderen falsch. Es gibt folglich keinen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff. Dieses Resultat ist unabhängig von Signallaufzeiten, die in realen Messprozessen zu Verzerrungen der Ergebnisse führen könnten, denn ideale Messgeräte rechnen solche Effekte heraus. Dies kann freilich auch bei realen Experimenten ohne Weiteres berücksichtigt werden. Das Ergebnis ist zunächst gegen die Intuition, und wirkt wenig glaubhaft. Die Relativitätstheorie ist aber auch in Bezug auf die Auswirkungen von Bewegung auf Zeit gut bestätigt. Es muss auch bedacht werden, dass unsere Intuition auf der Alltagserfahrung bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten beruht, sodass die relativistischen Effekte im Alltag nicht beobachtbar sind.

Betrachten wir zum Beispiel zwei Ereignisse, die in S' gleichzeitig stattfinden, mit $x'_1 < x'_2$, so ergibt sich in S ¹⁶

$$t_1 = \frac{t'_1 + \frac{v}{c^2}x'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{t'_2 + \frac{v}{c^2}x'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} < \frac{t'_2 + \frac{v}{c^2}x'_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = t_2. \quad (3.77)$$

Im System S würde also gemessen, dass Ereignis 1 vor Ereignis 2 stattgefunden hat. Nachdem die Beantwortung der Frage, ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden oder nicht, aber nur über die Messung festgelegt werden kann, bedeutet dies, dass Ereignis 1 in S vor Ereignis 2 stattgefunden hat.

Etwas aufwendiger ist die Berechnung der Zeitkoordinaten zweier Ereignisse in S' , wenn

¹⁶Beim Übergang vom System S' zum System S müssen die gestrichenen Koordinaten in der Lorentztransformation (3.59) und (3.63) einfach durch die ungestrichenen (und umgekehrt) ersetzt und das Minus durch ein Plus ersetzt werden. Diese Rücktransformation ergibt sich durch einfache Umformungen.

deren x' -Koordinaten sowie deren Gleichzeitigkeit in S bekannt sind. Wir verwenden, um die Rechnung übersichtlicher zu gestalten, die Abkürzung (3.56) für den Lorentzfaktor. Es gilt $t_3 = t_4$ und $x'_3 < x'_4$. Wir schreiben die Formeln zur Berechnung der Koordinaten t'_3 und t'_4 an und stellen darin x_3 bzw. die x_4 mithilfe der Lorentztransformation durch die gestrichenen Koordinaten dar

$$t'_3 = \gamma \cdot \left(t_3 - \frac{v}{c^2} x_3 \right) = \gamma \cdot \left(t_3 - \frac{v}{c^2} \cdot \gamma \cdot (x'_3 + vt'_3) \right) \quad (3.78)$$

$$t'_4 = \gamma \cdot \left(t_4 - \frac{v}{c^2} x_4 \right) = \gamma \cdot \left(t_4 - \frac{v}{c^2} \cdot \gamma \cdot (x'_4 + vt'_4) \right). \quad (3.79)$$

Durch Umformen erhalten wir daraus

$$t'_3 \cdot \left(1 + \gamma^2 \frac{v^2}{c^2} \right) = t'_3 \cdot \gamma^2 = \gamma \cdot \left(t_3 - \frac{v}{c^2} \gamma x'_3 \right) \quad (3.80)$$

$$t'_4 \cdot \left(1 + \gamma^2 \frac{v^2}{c^2} \right) = t'_4 \cdot \gamma^2 = \gamma \cdot \left(t_4 - \frac{v}{c^2} \gamma x'_4 \right). \quad (3.81)$$

Dabei haben wir verwendet, dass

$$\begin{aligned} 1 + \gamma^2 \frac{v^2}{c^2} &= 1 + \frac{\frac{v^2}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1 + \frac{-1 + \frac{v^2}{c^2} + 1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \\ &= 1 + \frac{(-1) \cdot (1 - \frac{v^2}{c^2})}{1 - \frac{v^2}{c^2}} + \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1 + (-1) + \gamma^2 = \gamma^2 \end{aligned} \quad (3.82)$$

gilt. Nun benutzen wir die Bedingungen an die Ereignisse, um eine Aussage über deren zeitliche Abfolge in S' machen zu können

$$t'_3 \cdot \gamma^2 = \gamma \cdot \left(t_3 - \frac{v}{c^2} \gamma x'_3 \right) = \gamma \cdot \left(t_4 - \frac{v}{c^2} \gamma x'_3 \right) > \gamma \cdot \left(t_4 - \frac{v}{c^2} \gamma x'_4 \right) = t'_4 \cdot \gamma^2. \quad (3.83)$$

Hieraus ergibt sich durch Division

$$t'_3 > t'_4, \quad (3.84)$$

was bedeutet, dass Ereignis 4 in S' vor Ereignis 3 eintritt. Im nachfolgenden Minkowski-Diagramm sind die beiden beschriebenen Situationen grafisch dargestellt.

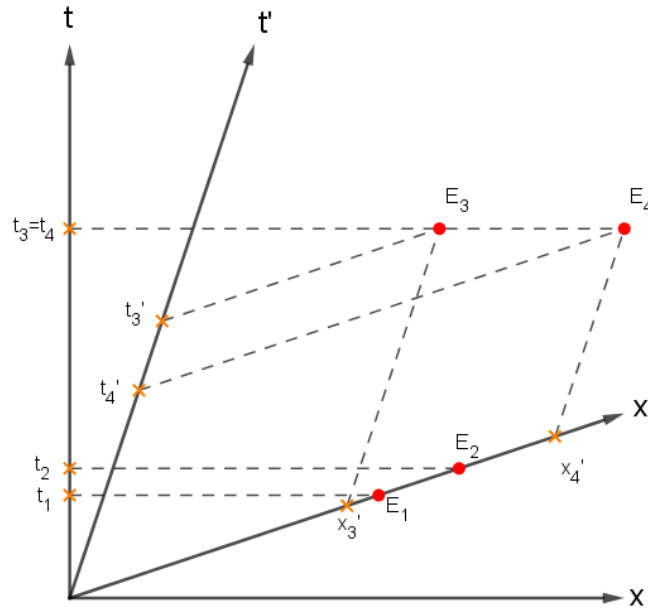


Abb. 3.1: Minkowski-Diagramm zur Relativität der Gleichzeitigkeit. Die Ereignisse E_1 und E_2 liegen auf einer Gleichzeitigkeitslinie in S' , in S tritt E_1 aber vor E_2 ein. Die Ereignisse E_3 und E_4 liegen auf einer Gleichzeitigkeitslinie in S , in S' tritt E_4 jedoch vor E_3 ein.

3.3.3. Längenkontraktion

Unter Galilei-Transformation bleiben die Längen von Objekten erhalten, was sich wiederum mit unserer Alltagserfahrung deckt. Wir betrachten (wie in den Interviewfragen) ideale Messgeräte, sodass Effekte, die durch die Lichtlaufzeit zustande kommen, berücksichtigt sind. Die spezielle Relativitätstheorie liefert auf die Frage nach der Länge eines bewegten Stabes wiederum eine überraschende Antwort. Wir betrachten wieder zwei Systeme S und S' wie im vorigen Abschnitt. Weiters betrachten wir einen in S' ruhenden Maßstab. Die Endpunkte des Maßstabs liegen zwischen den Punkten $x'_1 = 0$ und $x'_2 = l_0$, seine Länge in seinem Ruhesystem S' beträgt somit $x'_2 - x'_1 = l_0$. Welche Länge wird für diesen Stab im System S gemessen? Um diese Frage zu beantworten ist es notwendig, dass zwei Beobachter in S die Positionen der beiden Enden des Stabes gleichzeitig (in S) bestimmen. Dazu betrachten wir zwei Ereignisse. Ereignis 1 sei, dass das hintere Ende des Stabes einen Beobachter in S bei $x_1 = 0$ zur Zeit $t_1 = 0$ passiert. Ereignis 2 sei, dass das vordere Ende des Stabes einen Beobachter in S bei $x_2 = l$ zur Zeit $t_2 = 0$ passiert. Offenbar ist dann $l = x_2 - x_1$ die Länge des Stabes in S . Gesucht ist nun der Zusammenhang zwischen l und der bekannten Länge l_0 . Für die Koordinaten der beiden Ereignisse erhalten wir

$$\text{Ereignis 1: } \begin{cases} x_1 = 0, & t_1 = 0 \\ x'_1 = 0, & t'_1 = 0 \end{cases} \quad \text{Ereignis 2: } \begin{cases} x_2 = l, & t_2 = 0 \\ x'_2 = l_0, & t'_2 \end{cases} \quad (3.85)$$

Nun wenden wir die spezielle Lorentztransformation (3.58) an und erhalten

$$x'_2 = \gamma(x_2 - \underbrace{vt_2}_{=0}) = \gamma x_2 \stackrel{!}{=} l_0. \quad (3.86)$$

Für die Länge l des Stabes in S ergibt sich somit

$$l = x_2 - \underbrace{x_1}_{=0} = x_2 = \frac{l_0}{\gamma} = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (3.87)$$

Für $0 < v < c$ gilt

$$0 < \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1, \quad (3.88)$$

woraus jedenfalls

$$l < l_0 \quad (3.89)$$

folgt. Das bedeutet, dass für einen Maßstab in einem relativ zu diesem bewegten Inertialsystem immer eine kürzere Länge gemessen wird als in seinem Ruhesystem. Nachdem wiederum beide Inertialsysteme gleichwertig sind, kann über keine der gemessenen Längen gesagt werden, dass sie die tatsächliche Länge wäre. Das Einstein'sche Relativitätsprinzip impliziert also, dass Längen nicht absolut sind.

3.3.4. Die relativistische Masse

In diesem Abschnitt soll noch kurz das Problem der relativistischen Masse besprochen werden, da jedes der im folgenden Abschnitt untersuchten Schulbücher zu diesem Thema eine unbefriedigende Darstellung bietet.

Fließbach schreibt in seinem Buch „Die relativistische Masse“ [Fli18], dass die Masse ein Lorentzskalar, also invariant unter Lorentztransformation ist. Dementsprechend ist es nicht zulässig von einer „relativistischen Massenzunahme“ zu sprechen. Im Gegensatz dazu bemerkt Fließbach jedoch, dass es vertretbar ist von einer „relativistischen Masse“ als eigener Größe, die keine Masse im Sinne einer Ruhemasse ist zu sprechen. Er beschreibt, dass hiermit eine Größe bezeichnet wird, die bis auf einen Faktor c^2 mit der relativistischen Energie und bis auf einen Faktor c mit der 0-Komponente des 4-Impulses eines Teilchens übereinstimmt, sodass auch ihr Verhalten unter Lorentztransformation wohldefiniert ist. Dabei hält er es für zulässig, diesen Ausdruck zu gebrauchen, um die bei ansteigender Geschwindigkeit divergierende effektive Trägheit zu beschreiben, die eine Beschleunigung auf Lichtgeschwindigkeit unmöglich macht. Weiters wird die relativistische Masse oft ver-

wendet, weil die Ersetzung der „nichtrelativistischen Masse“ durch diese in Naturgesetzen eine einfache Verallgemeinerung auf den relativistischen Fall zu ermöglichen scheint. Dabei ist es jedoch so, dass dieses Rezept der Ersetzung der Masse durch die relativistische Masse nicht allgemein gültig ist und auch nicht kompatibel mit der Logik zur Aufstellung physikalischer Gesetze unter Verwendung von Symmetrieprinzipien. Dazu ist nämlich die genaue Festlegung des Grenzfalles (hier der Newton'sche Grenzfall) nötig, der aber mit der Ersetzung der Masse durch die relativistische Masse nicht kompatibel ist¹⁷. Außerdem wäre eine Unterscheidung zwischen einer longitudinalen und einer transversalen Masse nötig, je nachdem, ob die Relativgeschwindigkeit parallel, oder senkrecht zur Kraft steht. Diese Begriffe erschweren jedoch die kovariante Formulierung der relativistischen Mechanik.

In „Sextl Physik 8“ und „big bang 8“ wird jedoch von einer relativistischen Massenzunahme gesprochen. „Physik compact 8“ benutzt zwar nicht diesen Ausdruck, macht aber deutlich, dass es sich um eine Zunahme der Masse handelt. Damit beschränken sich die Schulbücher also nicht nur auf ein fragwürdiges Konzept zur Erklärung der divergierenden effektiven Trägheit, sondern verwenden sogar einen völlig falschen Begriff. In „big bang 8“ wird erklärt, dass es eine „schwere Masse“, die die gravitativen Eigenschaften eines Körpers beschreibt, und eine „träge Masse“, die den Widerstand eines Körpers gegen Bewegungsänderung beschreibt, gibt. Diese beiden Begriffe werden auch tatsächlich verwendet, seit dem Äquivalenzprinzip von Einstein jedoch miteinander identifiziert. Der Autor schreibt auch, dass diese beiden Massen für einen Körper gleich groß sind, und dass ein bewegter Körper natürlich nicht „dicker“ wird, womit er wohl andeuten möchte, dass seine schwere Masse nicht zunimmt. Er fährt jedoch fort, indem er erklärt, dass man sich durch die Unterscheidung der trägen und der schweren Masse die Massenzunahme so vorstellen kann, dass in der speziellen Relativitätstheorie nur die träge Masse eine Rolle spielt und die Aussage, dass die Masse eines bewegten Körpers zugenommen habe, also nur einen angewachsenen Widerstand gegen Bewegungsänderung beschreibt. Damit beschreibt er die von Fließbach beschriebene divergierende Trägheit, benutzt jedoch unpassende Begriffe und erweckt somit (entgegen dem Äquivalenzprinzip und seiner eigenen Behauptung) den Eindruck, dass nun eben die träge Masse eines bewegten Körpers doch größer als die schwere Masse wäre.

In allen Schulbüchern werden Gedankenexperimente beschrieben um die „Massenzunahme“ zu erklären. Dabei stellt die Darstellung in „Physik compact 8“ eine vereinfachte Version der Darstellung in [Dem13]¹⁸ dar. In dieser Darstellung wird ein Teilchen betrachtet, das sich relativ zu einem anderen Teilchen gleicher Ruhemasse mit hoher Geschwindigkeit bewegt und dieses elastisch streifend stößt, sodass beide eine gleich große

¹⁷Der Newton'sche Grenzfall bedeutet für ein Teilchen, dass die Bewegungsgleichung so aufzustellen ist, dass sie sich im Fall $v \rightarrow 0$ auf den bekannten Grenzfall reduziert. Die Ersetzung der Masse durch die relativistische Masse führt jedoch im Fall der Lorentzkraft zu falschen Resultaten.

¹⁸Auch in diesem Lehrwerk, das üblicherweise von Physikstudenten im ersten Semester benutzt wird, wird behauptet, dass die Masse eines Teilchens mit seiner Geschwindigkeit zunimmt.

Geschwindigkeitsänderung (in entgegengesetzte Richtungen) senkrecht zur Richtung der Relativbewegung erhalten. Dann wird argumentiert, dass vom Ruhssystem des ersten Teilchens die Bewegung des zweiten aufgrund der Zeitdilatation verlangsamt ist, und deshalb aufgrund der Impulserhaltung eine größere Masse folgen müsse. Anschaulicher (aber inhaltlich gleich) ist die Überlegung in „Sexl Physik 8“ und „big bang 8“. Hier wird ein Auto (bzw. ein Raumschiff) betrachtet, das gegen eine Wand fährt, wobei die Tiefe des erzeugten Lochs als Maß für den Impuls betrachtet wird. Dieser Vorgang wird aus einem senkrecht zur Fahrtrichtung des Autos relativ zu diesem mit hoher Geschwindigkeit vorbeibewegten System betrachtet. Aufgrund der Zeitdilatation läuft der Vorgang von diesem Standpunkt aus stark verlangsamt ab, sodass die Größe des vom Auto geschlagenen Loches überraschend ist. Nun wird ebenso argumentiert, dass das Problem durch die Annahme einer größeren Masse gelöst wird. Da der Vorgang aufgrund der Zeitdilatation um den Faktor $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ verlangsamt ist, muss demnach die Masse um den Kehrwert dieses Faktors, also um den Lorentzfaktor (3.56) vergrößert sein. Das Argument klingt zunächst einleuchtend, jedoch wird dabei vernachlässigt, dass es genauso gut sein könnte, dass die klassische Definition des Impulses als Produkt aus Masse und Beschleunigung für hohe Relativgeschwindigkeiten unbrauchbar ist. Das ist auch der tatsächlich in der theoretischen Physik beschrittene Weg, sodass man völlig ohne eine „Massenzunahme“ auskommt. Die Wortwahl in „Sexl Physik 8“ ist dabei besonders unpassend, da hier geschrieben wird, dass für die Erklärung des tiefen geschlagenen Loches eine vergrößerte Masse gefordert werden **muss**. Solche Argumentationsweisen verankern die Fehlvorstellung einer relativistischen Masse, bisherigen Studien zufolge, offenbar stark, sodass viele selbst nach einem Kurs im Studium zum Thema, bei dem dieses Konzept nicht verwendet wird, noch an ihm festhalten [Sel11]. Das Denken der Schüler wird dabei auch nicht geschult, denn die Möglichkeit, dass der Impuls aus der klassischen Physik selbst geändert werden muss, wird nicht eingeräumt, und in keinem Schulbuch wird den Schülern die Aufgabe gestellt, selbst eine Erklärung für die unveränderte Größe des Loches zu finden. Vor dem Hintergrund, dass im Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie einige klassische Formeln, wie die Galilei-Transformation, die Geschwindigkeitsaddition, oder die kinetische Energie modifiziert werden, ist es besonders fragwürdig, weshalb dies nicht auch mit dem Impuls gemacht wird.

Weiters wird in allen Schulbüchern behauptet, dass die „relativistische Massenzunahme“ experimentell gut bestätigt sei, wobei Experimente im LHC am CERN als Beispiel verwendet werden. Dabei wird oft auch rechnerisch gezeigt, um wie viel die Magnetfelder aufgrund der „relativistischen Massenzunahme“ größer sein müssen. Dabei wird übersehen, dass dies nur eine größere effektive Trägheit zeigt, woraus nicht ohne Weiteres auf eine größere Masse geschlossen werden kann. Dies könnte sogar im Unterricht als Beispiel dazu dienen, dass die Interpretation von Experimenten nicht immer offensichtlich ist, womit empiristischen Vorstellungen begegnet werden kann.

Es stellt sich auf diesem Abschnitt zu den fachlichen Grundlagen aufbauend noch die

Frage, ob es sinnvoller ist, die Lorentztransformation einzuführen und die relativistischen Effekte daraus abzuleiten (so wie wir es hier gemacht haben), oder mit den überraschenden Effekten anzufangen, um die Neugier der Schüler zu wecken. Zweifelsohne ist der erste Weg der historisch korrekte und jener, der die Natur der Relativitätstheorie besser zum Ausdruck bringt. Koordinatentransformationen werden allerdings in der Schule kaum behandelt, sodass sie einen für die Schüler unnatürlichen Einstieg darstellen könnten. Weiters legt der aktuelle Forschungsstand (siehe Kapitel 2) nahe, dass die relativistischen Effekte auf großes Interesse bei vielen Schülern stoßen. Folglich scheint dies ein guter Weg zu sein, um die Relativitätstheorie einzuführen, wobei die Herausforderung besonders darin bestehen wird, dann das hier besprochene zentrale Thema der Relativitätstheorie als solches darzustellen. Hier stellt sich auch die Frage, welches Ziel mit dem Physikunterricht insgesamt verfolgt wird. Ist es das Ziel, ein (auf Schulniveau) möglichst akkurates Bild von physikalischen Arbeitsweisen und Theorien zu vermitteln, oder deren Bedeutung für das tägliche Leben anhand der Effekte hervorzuheben, oder aber Neugier aufgrund der Nähe zu Themen, unter anderem der Science-Fiction, zu wecken, die anhand der physikalischen Ergebnisse im Unterricht diskutiert werden können? Freilich wird meist eine Kombination dieser Punkte vorliegen, und es stellt sich die Frage, was die jeweilige Lehrkraft besonders hervorheben, oder fördern möchte. Jedenfalls müssen diese Hintergründe der Lehrkraft bewusst sein, damit kein verzerrtes Bild der speziellen Relativitätstheorie und der Physik insgesamt vermittelt wird. Auch die Förderung begabter und interessierter Schüler (z.B. auch im Rahmen eines Wahlpflichtfachs) wird dadurch begünstigt, sodass den Schülern möglichst gute Bedingungen für die weitere Ausbildung geschaffen werden.

4. Analyse der Schulbücher in Österreich

In [Sel11] wird eingeräumt, dass viele Missverständnisse durch Darstellungen in Schulbüchern verursacht worden sein könnten. Dabei bezieht sich diese Aussage vorrangig auf türkische und englischsprachige Bücher [Sel11]. Da Schulbücher den Unterricht begleiten sollen und auch unabhängig vom Unterricht von Schülern gelesen werden können, ist es naheliegend, anzunehmen, dass die in ihnen enthaltenen Darstellungen einen Einfluss auf die Vorstellungen der Schüler haben könnten¹⁹. Folglich werden in diesem Abschnitt die Kapitel zur speziellen Relativitätstheorie aus allen österreichischen Schulbüchern untersucht. Dazu ist zunächst zu bemerken, dass die spezielle Relativitätstheorie dem österreichischen Lehrplan zufolge ausschließlich im 1. Semester²⁰ in der 8. Klasse (12. Schulstufe), also im abschließenden Jahr unterrichtet wird [5]. Folglich werden auch nur Bücher für diese Schulstufe betrachtet. Insgesamt sind nur drei Schulbücher in Österreich für die 8. Klasse approbiert:

- „big bang 8“ [Apo19]
- „Physik compact 8“ [NNZ19]
- „Sexl Physik 8“ [Sexl19]

Weiters gibt es im Lehrplan eine Unterscheidung, je nach insgesamt verfügbaren Wochenstunden im Fach Physik in der Oberstufe (und somit je nach gewähltem Zweig, bzw. gewählter Schule). Für die Relativitätstheorie finden sich im Lehrplan folgende Vorgaben:

- **Schulen mit mehr als sieben Wochenstunden Physikunterricht in der Oberstufe:** *Konzepte der speziellen Relativitätstheorie, Grundidee der allgemeinen Relativitätstheorie* [5]
- **Schulen mit bis zu sieben Wochenstunden Physikunterricht in der Oberstufe:** *Grundidee der speziellen Relativitätstheorie* [5]

Demnach wird die allgemeine Relativitätstheorie nicht in allen Schulen bzw. Klassen unterrichtet, die spezielle Relativitätstheorie muss hingegen (wenn auch teilweise nur in Grundzügen) behandelt werden. Da diese Eintragungen alle Vorgaben zum Thema darstellen, ist es erstaunlich, dass alle Schulbücher grob der gleichen Struktur folgen, die hier zur Übersicht angegeben ist.

- 1) Weltbild vor der Relativitätstheorie, Äthertheorie und Michelson-Morley Experiment
- 2) Grundprinzipien der speziellen Relativitätstheorie (Relativitätsprinzip und Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit)

¹⁹Dies ist insbesondere bei jenen Schülern zu erwarten, die später ein Physikstudium betreiben wollen, da ihr Interesse am Fach eher zu selbstständiger Lektüre führt.

²⁰Da die Semester im Lehrplan von der 5. Klasse (9. Schulstufe) weg nummeriert werden, handelt es sich um das 7. Semester.

- 3) Relativistisches Beobachten, Begriffsbildung eines Inertialsystems als System von relativ zueinander ruhenden Beobachtern mit synchronisierten Uhren
- 4) Relativität der Gleichzeitigkeit
- 5) Zeitdilatation (inklusive Zwillingsparadoxon) und Lorentzkontraktion
- 6) Lorentz-Transformation und Geschwindigkeitsaddition
- 7) Relativistische (dynamische) Masse bzw. Massenzuwachs
- 8) Äquivalenz von Masse und Energie

Dies stellt ein grobes Schema dar, dem die drei Schulbücher mit geringen Abweichungen folgen. Da die Übereinstimmung sehr groß ist, scheint es sinnvoller bei der Behandlung der einzelnen Bücher die Abweichungen gesondert zu erwähnen, als jedes Mal den gesamten Ablauf darzustellen. Insbesondere bei der Präsentation von Anwendungen der speziellen Relativitätstheorie ergeben sich Unterschiede. Weiters sind trotz der großen Parallelen im Verlauf große Unterschiede in den Präsentationen, den Argumentationen und beim Anteil der geforderten Selbsttätigkeit der Schüler zu bemerken. Die relativistische Masse wurde bereits im vorherigen Abschnitt ausführlich besprochen, da dieses Thema in allen Schulbüchern unbefriedigend präsentiert wird. Die Reihenfolge, in der die Schulbücher besprochen werden, ist zweckmäßig.

In allen Schulbüchern findet sich auch ein Verweis auf Reihenentwicklungen, was mathematisch über dem Schulniveau liegt. Es ist fraglich, ob es an diesen Stellen günstiger wäre, einfach erste Näherungen zu geben. Umgekehrt könnte das aber auch die Neugier mathematisch interessierter Schüler wecken und in einem Wahlpflichtfach behandelt werden.

Ein der speziellen Relativitätstheorie innewohnendes Problem ist, dass vor der Behandlung der Relativität der Gleichzeitigkeit erst eine Definition der Gleichzeitigkeit gegeben werden muss. Dabei muss zunächst die Notwendigkeit dafür erläutert werden, indem argumentiert wird, dass Ereignisse, die wir gleichzeitig sehen, nicht gleichzeitig stattgefunden haben müssen. Darauf aufbauend werden dann Ereignisse als gleichzeitig definiert, wenn von ihnen ausgehende Lichtstrahlen einen Beobachter in der Mitte gleichzeitig erreichen, und die Vorstellung eines Inertialsystems als Netz relativ zueinander ruhender Beobachter mit synchronisierten Uhren wird etabliert, um Laufzeiteffekte vernachlässigen zu können. Direkt im Anschluss wird die Relativität der Gleichzeitigkeit besprochen. Bei diesem Ablauf, bei dem, zusammengefasst, erst beschrieben wird, dass Ereignisse, die gleichzeitig stattzufinden scheinen, nicht unbedingt gleichzeitig stattgefunden haben müssen, dann die Gleichzeitigkeit definiert wird, um anschließend zu zeigen, dass Vorgänge, die für einen Beobachter gleichzeitig an verschiedenen Orten stattfinden für einen relativ dazu bewegten Beobachter sicher nicht gleichzeitig stattfinden, könnte sehr wohl die Vorstellung begünstigen, dass es sich erst recht wieder um einen scheinbaren Effekt handelt und

dass z. B. die Lichtlaufzeit nicht korrekt berücksichtigt wurde. Da dieses Problem jedoch aus der Theorie selbst erwächst, soll es bei den einzelnen Schulbüchern nicht extra diskutiert werden.

4.1. Sexl Physik 8

Zunächst wird die Darstellung im Buch „Sexl Physik 8“ [Sexl19] besprochen, da dieses Schulbuch auch von den in den Interviews befragten Schülern verwendet wird und somit für dieses Projekt besondere Relevanz hat²¹.

In dem Buch wird Wert auf ausführliche Texte und Rechnungen - sowohl Herleitungen, als auch Anwendungsbeispiele - gelegt. Prinzipiell sollte es für interessierte Schüler möglich sein, sich mit den Grundlagen (und nur mit diesen) allein durch die Lektüre dieses Buches und ohne weitere Erklärungen vertraut zu machen. Dabei gibt es im Text nur selten Stellen, an denen die Schüler aufgefordert werden, ein Problem selbst in Angriff zu nehmen. Es ist daher wenig Selbsttätigkeit der Schüler zu erwarten²². Bei den Rechnungen werden teilweise Zwischenschritte übersprungen, die für die meisten Schüler nicht trivial sein dürften. Auf Seite 21 findet sich bei der Herleitung der Lorentzkontraktion aus der Lorentztransformation in der ersten Zeile ein Rechenfehler. Es wird geschrieben, dass die Lorentztransformation „offenkundig“ eine Verallgemeinerung der Galilei-Transformation sei. Diese Aussage könnte bei Schülern zu Frustration führen, wenn sie diese Verbindung nicht schnell erkennen (was bei den meisten wahrscheinlich der Fall sein dürfte). Dies könnte die Lektüre für Schüler erheblich erschweren. Es finden sich auf den meisten Seiten zahlreiche Bilder und grafische Darstellungen (z. B. von Gedankenexperimenten), die jedoch nicht immer im Text referenziert sind, sodass es Lesern bei der ersten Lektüre schwerfallen könnte, sich zu orientieren. Dabei finden sich auch viele Exkurse zu kleineren Punkten wie z. B. der Funktionsweise von Atomuhren, die den Lesefluss unterbrechen, aber auch interessante zusätzliche Informationen bieten können.

4.1.1. Positive Aspekte

Die meisten Zusammenhänge sind sowohl inhaltlich als auch mathematisch (auf Schulniveau) korrekt wiedergegeben, sodass ein erster Überblick über die SRT ermöglicht wird.

Es wird explizit gezeigt, dass die Galilei-Transformation das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht erfüllt und die Lorentztransformation diesen Fehler korrigiert (S.20f). Es wird dabei auch klar gesagt, dass die Lorentztransformation deshalb die im Sinne der SRT richtige Transformation zwischen Inertialsystemen darstellt. Im Gegensatz dazu finden sich in anderen Schulbüchern Aussagen, die ein falsches Bild von der Bedeu-

²¹Es sei an dieser Stelle auch angemerkt, dass der Autor selbst erste „Bekanntschaft“ mit der speziellen Relativitätstheorie durch die Lektüre dieses Schulbuchs geschlossen hatte. Obwohl es sich dabei um eine ältere Auflage handelte, hat sich außer dem Layout offenbar nicht viel geändert.

²²Diese ist jedoch ganz besonders für das Erlernen der speziellen Relativitätstheorie gefordert worden (siehe Kapitel 2)

tung dieses Ergebnisses der relativistischen Geschwindigkeitsaddition zeichnen.

Die Notwendigkeit einer klaren Definition von Gleichzeitigkeit und die Definition selbst werden ausführlich besprochen (S. 12). Ebenso wird das „Beobachten“ klar vom „Zusehen“ unterschieden, und die Vorstellung eines Inertialsystems als Netz von relativ zueinander ruhenden Beobachtern mit synchronisierten Uhren wird etabliert, um Effekte der Lichtlaufzeit vernachlässigen zu können (S. 13). Somit sollte es für Schüler prinzipiell möglich sein, eine brauchbare Vorstellung von Inertialsystemen in der Relativitätstheorie aufzubauen.

Der Zeit ist ein eigener Abschnitt gewidmet (S. 11f), in dem herausgearbeitet wird, dass die Zeit in der Physik über ihre Messung festgelegt ist, und Fragen nach der Zeit nur in diesem Sinne beantwortet werden können.

Die Vorstellung, dass von der Zeitdilatation nur die Messung, nicht aber der tatsächliche Verlauf der Zeit betroffen ist, wird durch die Beschreibung eines Experiments zum Myonenzerfall attackiert (S. 17). In diesem Beispiel wird klar, dass vom System der Erde aus betrachtet die Zeit im System der Myonen tatsächlich langsamer vergehen muss, da sonst kein so großer Anteil zur Erdoberfläche gelangen könnte. Ob es den Schülern gelingt, diesen Sachverhalt von kleinen Teilchen auch auf einen Menschen, der in einem Raumschiff reist, zu übertragen, ist fraglich. Das ebenfalls behandelte Zwillingsparadoxon könnte hier helfen (S. 16). Mit dem Experiment zum Myonenzerfall wird auch die Vorstellung eines ruhenden erdfesten Systems konfrontiert, da bei der grafischen Darstellung auf Seite 19 der Vorgang auch aus dem Ruhssystem der Myonen betrachtet wird, in dem sich die Erde auf die Myonen zubewegt. Die Darstellung des Zwillingsparadoxons (S. 16) könnte dies aber konterkarieren.

Es wird schön anhand des Relativitätsprinzips deutlich gemacht, weshalb sich die anhand von Lichtuhren hergeleitete Zeitdilatation auch auf alle anderen Arten von Uhren (und somit den Gang der Zeit selbst) beziehen muss (S. 16).

Nach der Behandlung der Relativität der Gleichzeitigkeit wird die Frage danach, welcher der Beobachter Recht habe, und ob die Ereignisse nun gleichzeitig stattgefunden haben oder nicht, aufgeworfen. Die Vorstellung einer neutralen Sicht auf relativistische Effekte wird somit attackiert, da die Schüler aufgefordert werden, zu begründen, weshalb es eben keine solche Sicht geben kann (S. 15). Auch die Darstellung des Gedankenexperiments zur Relativität der Gleichzeitigkeit mittels zweier sich aneinander vorbeibewegender Raumschiffe, die Uhren, die sich jeweils am vorderen und am hinteren Ende befinden, mittels eines Lichtsignals aus der Mitte synchronisieren. Dabei wird auch schön die Symmetrie aufgrund der Gleichwertigkeit der Inertialsysteme veranschaulicht (S. 14).

4.1.2. Begünstigende Faktoren für Fehlvorstellungen

Leider finden sich demgegenüber auch zahlreiche Stellen im Buch, die die Festigung oder sogar Bildung von falschen Vorstellungen begünstigen könnten.

Eine empiristische Vorstellung, wie sie bei Schülern offenbar häufig auftritt [WSH17], wird durch die Darstellung in „Sextl Physik 8“ unterstützt. Bei der Darstellung des Michelson-Morley-Experiments (S. 6-7) wird verkürzt behauptet, dass der negative Versuchsausgang die Ätherhypothese widerlegte. Dabei wurde an dem Äther als Medium zur Lichtausbreitung danach noch fast zwei Jahrzehnte festgehalten, wobei diese so modifiziert wurde, dass der Versuchsausgang (wenn auch nicht sehr überzeugend) argumentiert werden konnte. Auch die Theorie eines von der Erde teilweise mitgeführten Äthers wurde diskutiert. Die verkürzte Darstellung lässt es jedoch so erscheinen, als wäre nach dem Experiment sofort klar gewesen, dass die Äthertheorie unbrauchbar ist. Dadurch wird bei Schülern der Eindruck verstärkt, dass physikalische Theorien direkt aus Experimenten abgeleitet bzw. von diesen widerlegt werden. Im Gegensatz dazu waren viele Experimente und ein neuer Ansatz, der sich nicht aus dem Experiment ableiten ließ, notwendig um eine überzeugende Basis für die Aufgabe der Äthertheorie zu schaffen. Außerdem entsteht beim Lesen der Eindruck, Einstein habe die beiden Grundannahmen der speziellen Relativitätstheorie auf dem Versuchsausgang des Experiments von Michelson und Morley begründet (S. 9). Einstein selbst bestritt jedoch von dem Experiment gewusst zu haben, und begründete seine Annahmen mit der Aberration von Sternenlicht und den Experimenten von Fizeau zur Lichtgeschwindigkeit in bewegtem Wasser [Sha63]. Erst später räumte Einstein ein, dass er durch die Arbeiten von Lorentz indirekt von dem Michelson-Morley Experiment erfahren habe [Sha64].

Es wird auch auf eine andere Art ein falsches Bild des physikalischen Arbeitens (bzw. des wissenschaftlichen Arbeitens allgemein) vermittelt. Auf den Seiten 5 und 10 wird behauptet, dass an der Relativitätstheorie aufgrund der experimentellen Befunde nicht mehr gezweifelt werden kann bzw. dass sich die Frage nach ihrer Richtigkeit nicht mehr stellen würde. Dabei wird der Eindruck vermittelt, eine wissenschaftliche Theorie könne verifiziert werden (und dass dies bei der Relativitätstheorie der Fall sei), was jedoch prinzipiell niemals möglich ist. Ebenso schien es auch vor der Relativitätstheorie unmöglich, an der Newton'schen Mechanik zu zweifeln, die jedoch, wie wir mittlerweile wissen, nur im Spezialfall kleiner Geschwindigkeiten gilt. Es sei hier auch an die Grundaussage des Konstruktivismus (Kapitel 2) erinnert. Weiters wird behauptet, dass aufgrund der Tatsache, dass die Lorentztransformation für Überlichtgeschwindigkeit sinnlos wird, die Existenz von Körpern, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen, ausgeschlossen ist (S. 21). Dabei entsteht der Eindruck, die (ja angeblich über jeden Zweifel erhabene) spezielle Relativitätstheorie würde diktieren, was es geben könne und was nicht. Es ist zwar richtig, dass die Existenz überlichtschneller Teilchen („Tachyonen“) aufgrund der Erkenntnisse der speziellen Relativitätstheorie eher nicht zu erwarten ist, sollten jedoch solche Teil-

chen entdeckt werden, so wäre es die Theorie, die modifiziert werden müsste, und nicht der experimentelle Befund. Weiters ist es gerade Gegenstand der aktuellen Grundlagenforschung, nach einer vereinheitlichten Theorie der „Quantengravitation“ zu suchen, die die Relativitätstheorie als Grenzfall enthält [Haw12]. Dementsprechend wird mit solchen Aussagen ein falsches Bild der Physik vermittelt.

Die Vorstellung, dass Geschwindigkeit gleichbedeutend mit Schnelligkeit (Tempo) ist, die schon im Unterricht zur klassischen Mechanik zu Problemen führt [DSWH18], wird mehrmals ungünstig adressiert. In der Physik ist die Geschwindigkeit eine vektorielle Größe, umfasst also Richtung und Betrag (letztere entspricht dem Alltagsbegriff Geschwindigkeit). Auf den Seiten 8 und 9 wird von der Änderung der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung bzw. von der Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von diesen beiden Größen gesprochen. Bei dieser, aus der Alltagssprache stammenden, Formulierung entsteht der Eindruck, als wären Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung zwei voneinander unabhängige Größen. Dies kann die meist bei den Schülern vorhandenen Fehlvorstellungen verstärken und konterkariert die Bemühungen des Mechanikunterrichts.

Beim Lesen entsteht zunächst auch der Eindruck, dass Einstein der Erfinder des Relativitätsprinzips, also der Gleichberechtigung aller Inertialsysteme sei (S. 9). Diesem Eindruck wird auf der Folgeseite begegnet, indem klargestellt wird, dass Einstein das Relativitätsprinzip nur ausgedehnt habe, jedoch könnte die Darstellung bei unaufmerksamer Lektüre schnell zu einem falschen Bild des historischen Ablaufs führen.

Obwohl (wie vorhin erwähnt) klargestellt wird, dass die Zeit nur über ihre Messung festgelegt ist, fehlt eine solche Aussage über die Länge von Objekten. Damit wird der Vorstellung, der zufolge die Länge eine von der Messung unabhängige Eigenschaft eines Objekts ist, begünstigt.

Trotz der guten inhaltlichen Aufbereitung des Inertialsystems und des Beobachtens von Ereignissen (siehe voriger Abschnitt) wird der Begriff „Ereignis“ selbst nie definiert. Es fehlt der Verweis darauf, dass es sich um einen Punkt in der Raumzeit handelt.

Die Kenntnis der klassischen Geschwindigkeitsaddition wird vorausgesetzt, obwohl sie vielen Schülern nicht bekannt sein dürfte. Eine Behandlung dieses Themas anhand von Beispielen findet sich abgesehen von einer Berechnung zur Lichtgeschwindigkeit, die zeigen soll, dass die Galilei-Transformation nicht mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit verträglich ist, nicht.

Bei der Behandlung der Zeitdilatation findet sich ein etwas merkwürdiges Argument zum Vorwurf, dass nach dem Relativitätsprinzip sowohl die in der Herleitung als bewegt betrachtete Uhr C, als auch die als ruhend betrachteten Uhren A und B vom Standpunkt des jeweils anderen Systems aus nachgehen müssten, da die Rollen auch vertauscht werden

können. Während es hier ausreichen würde, zu sagen, dass dies keinen „Schwindel“ der Relativitätstheorie offenbart, sondern eben eine der Eigenschaften der Zeit ist, die unserer Intuition widersprechen, wird stattdessen ins Feld geführt, dass dieser Vorwurf nicht gültig sei, da im Ruhssystem der Uhr C nicht beurteilt werden kann, ob A und B nachgehen, da hierfür zwei Uhren notwendig wären (S. 16f). Dabei wäre es kein Problem eine Uhr D einzuführen, die relativ zu C ruht, sodass sich wiederum ergeben würde, dass aus dem Ruhssystem von A und B heraus betrachtet die Uhren C und D nachgehen und umgekehrt. Es wäre wohl einfacher, das gleiche Argument wie bei der Relativität der Gleichzeitigkeit zu benutzen (S. 15), dass es keine neutrale Sicht auf die Vorgänge gibt, und anzumerken, dass es erst dann zu einem Widerspruch käme, wenn jeder Beobachter immer noch sehen würde, dass die jeweils anderen Uhren nachgehen, wenn sich alle im gleichen Inertialsystem befinden (siehe Zwillingsparadoxon). Durch die im Buch dargestellte Lösung könnte der Eindruck entstehen, dass es sich nur um einen scheinbaren Effekt handelt.

Ein großes Problem beim Lernen könnten einige richtig gemeinte, aber ungünstig formulierte Aussagen darstellen. An mehreren Stellen wird davon gesprochen, dass die Länge eines bewegten Objekts einem ruhenden verkürzt „erscheint“ (S. 18), noch dazu wird gleich danach bei der Behandlung der optischen Erscheinung schnell bewegter Körper von „scheinbaren“ Verzerrungen gesprochen. Während die Lorentzkontraktion jedoch eine Tatsache ist, sind die optischen Verzerrungen keine tatsächlichen Verzerrungen des Objekts. Die verwendeten Wörter sind zwar verschieden, aber so ähnlich, dass es für Schüler schnell zu einer Verwechslung kommen könnte, sodass die Lorentzkontraktion möglicherweise schlussendlich nur als Scheineffekt betrachtet wird²³. Erst bei der Herleitung der Lorentzkontraktion aus der Lorentztransformation (S. 21) wird geschrieben, dass die Länge verkürzt **ist**. Weiters wird bei der Behandlung der relativistischen Masse (die ja im Buch fälschlicherweise als realer Effekt angenommen wird) ebenso mehrmals geschrieben, dass die Masse einem ruhenden Beobachter vergrößert erscheint. Diese ungünstige Wortwahl könnte die Vorstellung, dass es sich um scheinbare Effekte handelt, bei den Schülern tief verankern. Sie findet sich nur in diesem Schulbuch so exzessiv²⁴.

Im Zusammenhang zur Lorentzkontraktion ist noch zu erwähnen, dass zwar den Schülern die Aufgabe gestellt wird, anhand einer geschilderten Situation (Rohr, das in anderes passt, fliegt durch dieses hindurch) zu begründen, dass es keine Kontraktion quer zur Bewegungsrichtung gibt (S. 18), eine Auflösung dieser Frage findet sich jedoch nirgendwo im Buch.

²³Es ist hier anzumerken, dass es dem Autor bei der ersten Lektüre des Buches als Schüler selbst so erging. Das Problem wurde erst gelöst, als bei der Behandlung einer Aufgabe klar wurde, dass die Länge tatsächlich verkürzt ist (Die Lösung der Aufgabe gestaltete sich dementsprechend schwierig und die Lösung war zunächst verwirrend).

²⁴Falls interessierte Schüler dann mit solchen Vorstellungen ein Studium beginnen und dabei das oft benutzte Werk von Demtröder zur Experimentalphysik verwenden, wird diese Vorstellung sogar noch gefördert, da auch dort im Abschnitt über die Lorentzkontraktion geschrieben wird „Die Länge eines bewegten Maßstabes erscheint dem ruhenden Beobachter kürzer zu sein, als wenn derselbe Maßstab relativ zu ihm ruhte.“[Dem13].

Bei der Formulierung der Bewegungsvorgänge wird oft nicht sauber auf die Sprache geachtet. Manche Beispiele scheinen somit nicht die Relativbewegung in den Vordergrund zu stellen, sondern sprechen von einem ruhenden und einem bewegten Objekt, bzw. Beobachter (z. B. S. 15, Herleitung der Zeitdilatation anhand zweier ruhender Uhren und einer bewegten Uhr.). Dadurch könnte der Eindruck eines absoluten Ruhezustands und einer absoluten Bewegung entstehen, oder verstärkt werden. Besonders deutlich wird dies bei Aussagen wie: „Aus der Sicht eines ruhenden Beobachters erscheint ein bewegter Gegenstand (...).“. Es wird zwar auch an mehreren Stellen die Bedeutung der Relativbewegung hervorgehoben, jedoch ist es hier notwendig, auf eine konsistente Sprache zu achten.

Ein besonders gravierendes Beispiel für das eben angesprochene Problem ist die Behandlung von Beispielen, in denen das System der Erde als ruhendes System behandelt wird. Oft wird nicht explizit beschrieben, dass die Erde als Ruhssystem gewählt wurde, sodass es den Schülern selbstverständlich scheinen könnte, dies immer zu tun. Ein Beispiel dafür ist die Behandlung des CERN-Experiments zum Myonenzerfall, oder des Hafele-Keating-Experiments (beide S. 17). Hingegen wird dieser Vorstellung, der Erde als absolut ruhendem Bezugssystem, mit der Darstellung des Myonenzerfalls in der Atmosphäre begegnet (S. 18). Problematisch ist in diesem Zusammenhang jedoch die Diskussion des Zwillingsparadoxons (S. 16), da hier der Symmetriebruch aufgrund der Tatsache, dass der reisende Zwilling umkehrt (und mindestens dreimal beschleunigt) so ausgedrückt wird, dass „**Nur** die Erde“ in hinreichender Näherung in einem Inertialsystem ruht. Diese Aussage könnte von den Schülern so missverstanden werden, dass immer nur die Erde als Inertialsystem betrachtet werden kann.

Viele der hier besprochenen Stellen beziehen sich insbesondere auf sprachliche Feinheiten. Es ist klar, dass eine konsequente Verwendung einer der Relativitätstheorie angemessenen Sprache (z. B. von einem als ruhend betrachteten System und einem relativ dazu bewegten zu sprechen und nicht einfach von einem ruhenden und einem bewegten System) etwas unnatürlich wirkt, jedoch ist sie notwendig, um den vorrangigen Aspekt der Relativbewegung und der Umrechnung von Koordinaten zwischen Inertialsystemen zu verdeutlichen und Fehlvorstellungen zu vermeiden.

4.2. Physik compact 8

Als nächstes wird das Buch „Physik compact 8“ betrachtet, da es in der Gestaltung dem eben betrachteten Schulbuch näher liegt.

Die Struktur folgt in diesem Buch wiederum der bereits in der Einleitung zu Abschnitt 4 beschriebenen. Dabei sind die letzten beiden Punkte vertauscht und Punkt 3 und 4 zu einem einzigen kurzen Kapitel zusammengefasst. Im Gegensatz zu „Sextl Physik 8“ finden sich am Ende noch viele Beispiele für die Anwendung der speziellen Relativitätstheorie

zur Erklärung verschiedener Effekte und ein kurzer Abschnitt über die Relativität der Elektrodynamik. Insgesamt ist zu sagen, dass das Buch seinem Namen alle Ehre macht, da die Inhalte sehr kompakt dargestellt sind, was an manchen Stellen zu fragwürdigen Abstrichen führt.

Anders als im zuvor betrachteten Schulbuch werden die Schüler in „Physik compact 8“ in jedem der kurzen Unterkapitel (die längeren sind nur etwa zwei Seiten lang) bei zahlreichen Gelegenheiten aufgefordert, selbst tätig zu werden, um Probleme zu lösen. Der Text ist oft sehr kurz gehalten, und viele Punkte, die in „Sexl Physik 8“ fast wie in einem Vortrag präsentiert wurden, sollen hier von den Schülern selbst erledigt werden. Ob dies bei vielen Schülern gelingt ist insbesondere bei Herleitungen (z. B. bei der Zeitdilatation) fragwürdig. Die Eigentätigkeit der Schüler, die in Kapitel 2 beim Erlernen der speziellen Relativitätstheorie gefordert wurde, wird in diesem Schulbuch klar forciert, jedoch vielleicht an manchen Stellen sogar übertrieben. Mit Abbildungen und Exkursen wird wesentlich sparsamer umgegangen als bei „Sexl Physik 8“.

4.2.1. Positive Aspekte

Wie bereits angemerkt wird die Eigentätigkeit der Schüler durch zahlreiche Fragen und Problemstellungen gefordert und gefördert. Dabei handelt es sich um eine Vielfalt aus Rechenaufgaben, Argumentationen bezüglich relativistischer Probleme und Argumentationen zu Schlussfolgerungen aus der Relativitätstheorie für andere Fragen (z. B. in Bezug auf Determinismus).

Die Vorstellung der Absoluten Ruhe und Bewegung wird gezielt mit zwei Fragen an die Schüler attackiert (S. 6). Gleich daran anschließend wird ein Zitat von Einstein angefügt, dass das Relativitätsprinzip in der speziellen Relativitätstheorie verdeutlicht.

Die Längenkontraktion wird anschaulich mithilfe zweier Abbildungen aus der Zeitdilatation und dem Relativitätsprinzip hergeleitet.

Der Unterschied zwischen dem Dopplereffekt und dem relativistischen Dopplereffekt wird anhand einer Aufgabe für die Schüler verdeutlicht. Dabei sollen sie begründen, weshalb es beim relativistischen Dopplereffekt keine Fallunterscheidung zwischen einem ruhenden Beobachter und einer ruhenden Quelle gibt.

Die vielen im Anschluss behandelten Effekte, die mithilfe der Relativitätstheorie erklärt werden können, machen ihren Nutzen für die Forschung deutlich (S. 18-20).

Der Abschnitt zur Relativität der Elektrodynamik (S. 21f) macht die Ursprünge der speziellen Relativitätstheorie für die Schüler verständlicher.

Das Buch „Physik compact 8“ ist das einzige Schulbuch, das konsequent den Ausdruck „Vakuumlichtgeschwindigkeit“ anstelle der „Lichtgeschwindigkeit“ gebraucht.

4.2.2. Begünstigende Faktoren für Fehlvorstellungen

Trotz der Aufgaben für die Schüler, die die Vorstellung von absoluter Ruhe und Bewegung beseitigen sollen, ist das Buch an viele Stellen so geschrieben, dass eine solche Vorstellung unterstützt wird. Oft wird vom „Bewegungszustand des Beobachters“ gesprochen, und nicht von der Relativbewegung (z. B. S. 4, 8). Ebenso finden sich häufig die Formulierungen „im ruhenden System“, „im bewegten System“, oder „für ruhende Beobachter“, die ebenfalls solche Vorstellungen unterstützen (z. B. S. 7, 8). Es wäre wohl günstiger, hier von als ruhend betrachteten Systemen, oder Beobachtern und von relativ dazu bewegten Systemen zu sprechen. Weiters finden sich die - auch in vielen anderen Medien verwendeten - stark verkürzten Aussagen „Bewegte Uhren gehen langsamer“ und „Bewegte Maßstäbe sind kürzer“ zur Zeitdilatation bzw. zur Längenkontraktion. Auch hier werden durch die Formulierungen absolute Bewegungszustände suggeriert (S. 8).

Wie auch im in „Sextl Physik 8“ wird die klassische Geschwindigkeitsaddition vorausgesetzt (S. 13).

Die Darstellung zur Standardkonfiguration von Inertialsystemen, die wir auch in Kapitel 3 verwendet haben, wird bei der Behandlung der Galilei- und Lorentztransformation stark verkürzt dargestellt. Dass die Ursprünge bzw. Achsen bei $t = t' = 0$ zusammenfallen wird nicht erwähnt (S. 12).

Die Lorentztransformation wird aus den relativistischen Effekten und der Galilei-Transformation abgeleitet. Dabei dürfte es den Schülern kaum klar sein, weshalb an einer Stelle die x -Koordinate durch $c \cdot t$ und knapp danach die t -Koordinate durch $\frac{x}{c}$ ersetzt wird (S. 12). Dieser Ansatz könnte den Eindruck, dass die Lorentztransformation nur eine zusätzliche Erfindung ist, noch verstärken. Dabei sollte im Gegensatz dazu Wert darauf gelegt werden, zu verdeutlichen, dass eigentlich die relativistischen Effekte aus der Lorentztransformation abgeleitet werden, und nicht umgekehrt.

Die Relativität der Gleichzeitigkeit wird in einem kurzen Absatz besprochen, in dem zunächst über scheinbare Gleichzeitigkeit beim Sehen gesprochen und anschließend eine Definition für Gleichzeitigkeit gegeben wird (S. 7f). Die so eng zusammengedrückte Darstellung könnte die Vorstellung, dass es sich nur um einen scheinbaren Effekt handelt, (siehe Einleitung zu Kapitel 4) noch einmal verstärken.

Das eben besprochene Problem wird noch dadurch verstärkt, dass eine Vorstellung vom relativistischen Beobachten (also von einem Inertialsystem als Netz von relativ zueinander ruhenden Beobachtern mit synchronisierten Uhren) im Gegensatz zum Sehen völlig fehlt.

Folglich ist es allein durch die Lektüre dieses Buches einem Schüler nicht möglich, ein funktionales Verständnis der zentralen Begriffe „Inertialsystem“ und „Ereignis“ zu bilden. Auch die Bedeutung der Lorentztransformation, die ja zum Umrechnen der Koordinaten von Ereignissen zwischen Inertialsystemen dient, wird dadurch weiter geschmälert. Sie scheint, zumindest aus Sicht der Schüler, damit nur noch notwendig zu sein, um die relativistische Geschwindigkeitsaddition zu erklären.

Die Relativität der Gleichzeitigkeit wird durch ein Lichtsignal, das von der Mitte eines Waggons ausgeht und für einen Beobachter im Zug die Vorder- und Rückwand des Waggons gleichzeitig erreicht, für einen Beobachter auf den Bahngleisen jedoch nicht, eingeführt (S. 8). Dabei fehlt eine Feststellung bzw. Fragestellung dazu, welcher der beiden Beobachter Recht hat (nämlich beide). Dadurch könnte es dazu kommen, dass Schüler in dieser Situation das erdfeste System als absolutes Bezugssystem sehen und den Vorgang allein aus diesem System heraus beurteilen.

Die Behandlung der Längenkontraktion wird zwar meist sprachlich sauberer gestaltet als in „Sexl Physik 8“, jedoch findet sich auch hier einmal die Aussage, dass aus der Sicht eines Inertialsystems Längen in einem relativ dazu bewegten System verkürzt erscheinen (S. 9).

4.3. big bang 8

Zuletzt wird noch die Darstellung in „big bang 8“ behandelt, die am stärksten vom zu Beginn beschriebenen Muster abweicht.

Zunächst findet sich eine deutlich längere Behandlung der historischen Entwicklung bis zur Relativitätstheorie, die bereits bei Aristoteles und dem geozentrischen Weltbild beginnt. Ebenso wird vor der Äthertheorie das klassische Relativitätsprinzip besprochen. Nach der Behandlung der Längenkontraktion findet sich eine Sammlung von Scheinparadoxa inklusive Lösungen, und die Lorentztransformation ist vorerst ausgespart, sodass direkt zu Punkt 7 übergegangen wird. Anschließend findet sich eine Reihe von vertiefenden Themen zur speziellen Relativitätstheorie, wobei z. B. der relativistische Doppler-Effekt und die Geschwindigkeitsaddition behandelt werden. Erst zum Schluss dieses letzten Kapitels zur SRT wird die Lorentztransformation besprochen.

Die Sprache folgt bewusst nicht dem Stil wissenschaftlicher Texte (S. 3), um ihn für die Schüler anregender zu gestalten. Wie in „Sexl Physik 8“ gibt es zahlreiche Abbildungen, die jedoch nicht an den Seitenrändern stehen und im Text referenziert werden, sondern im Textverlauf eingebettet sind, was die Orientierung erleichtert. Der Stil der Abbildungen ähnelt oft Comics. Zu Beginn eines Abschnitts gibt es einige Fragen, über die die Schüler zunächst selbstständig nachdenken sollen. Die Auflösungen finden sich im nachfolgenden Text, wobei immer auf die jeweils zugehörige Frage verwiesen wird. Mathematik wird so

sparsam wie möglich benutzt, und bei der Behandlung der relativistischen Effekte gibt es immer zunächst eine qualitative und erst danach eine quantitative Behandlung.

4.3.1. Positive Aspekte

Die umfangreichere Behandlung der Entwicklung des Weltbildes ermöglicht eine bessere Einordnung der speziellen Relativitätstheorie. Die vorangestellte Behandlung des klassischen Relativitätsprinzips macht die Neuerungen Einsteins deutlicher (S. 4-7).

Die Vorstellung der absoluten Ruhe und Bewegung werden anhand ausführlicher Gedankenexperimente adressiert. Es wird auch explizit festgehalten, dass Ruhe und unbeschleunigte Bewegung äquivalent sind (S. 6f).

Die Idee und das erwartete Ergebnis des Michelson-Morley Experiments werden anhand einer ähnlichen Situation zweier Radfahrer (die die Lichtwellen darstellen), die in um 90° zueinander gedrehte Richtungen fahren, wobei einer der Fahrer Seitenwind hat, veranschaulicht.

An den Beginn wird mit einem Beispiel, in dem sich ein Raumschiff mit halber Lichtgeschwindigkeit von der Erde fortbewegt, und das einen Lichtstrahl in Bewegungsrichtung aussendet, der sich jedoch immer noch mit Lichtgeschwindigkeit relativ zur Erde bewegt, ein zunächst überraschender Effekt präsentiert (S. 12). Dies könnte sich positiv auf die Motivation der Schüler auswirken.

Der Unterschied zwischen Beobachten und Sehen wird deutlich herausgearbeitet. Dabei werden optische Verzerrungen bereits vor den relativistischen Effekten behandelt. Bei der Behandlung der relativistischen Effekte wird dann deutlich gemacht, dass es sich eben nicht um optische Verzerrungen handelt (S.12f, 15).

Es wird eine gute Vorstellung eines Inertialsystems als Netz relativ zueinander ruhender Beobachter mit synchronisierten Uhren entwickelt. Ereignisse werden zwar zunächst, wie in den anderen Schulbüchern, nicht als Punkte in der Raumzeit beschrieben, dies wird jedoch im Abschnitt zur Lorentztransformation nachgeholt (S. 35).

Es wird zur Behandlung der Relativität der Gleichzeitigkeit ein Beispiel mit drei Raumschiffen, die sich in einer Reihe relativ zu einem Beobachter bewegen, eingeführt. Die Uhren in den beiden äußeren Raumschiffen werden synchronisiert, indem ein vom mittleren Raumschiff ausgehendes Lichtsignal beide Uhren startet. Dazu werden sowohl Zeichnungen präsentiert, die die Sicht aus dem Ruhssystem der Raumschiffe, als auch aus dem Ruhssystem des Beobachters schildern. Die gewählte Situation wirkt vielversprechend um zu vermeiden, dass die Schüler hier eine Vorstellung einer absoluten Sicht auf relativistische Effekte entwickeln (und ein erdfestes System als absolutes ist völlig ausgeschlossen).

Anschließend wird diese Vorstellung auch direkt adressiert, indem klargestellt wird, dass beide Ansichten dazu, ob die Uhren synchron sind oder nicht, richtig sind. Die optische Darstellung ist auf den ersten Blick ansprechender und leichter verständlich als jene in „Sexl Physik 8“.

Die Vorstellung, dass sich die Zeitdilatation nur auf die Messung der Zeit bezieht, wird ebenfalls klar adressiert. Dazu dient ein Beispiel, in dem ein Raumschiff von der Erde aus mit hoher Geschwindigkeit zum Rand der Galaxie und wieder zurückreist. Es wird deutlich, dass die Raumfahrer langsamer altern und trotz der Unterlichtgeschwindigkeit den Rand der Galaxie erreichen können. Ebenso wird die praktische Unmöglichkeit einer solchen Reise aufgrund des Energiebedarfs besprochen.

Die Nichtexistenz einer Längenkontraktion quer zur Bewegungsrichtung wird mit einem Gedankenexperiment veranschaulicht, bei dem eine solche Querkontraktion zu einem logischen Widerspruch führen würde.

Es wird nie davon gesprochen, dass eine Länge verkürzt erscheint.

4.3.2. Begünstigende Faktoren für Fehlvorstellungen

Auch in diesem Schulbuch entsteht zunächst der Eindruck, dass Einstein die spezielle Relativitätstheorie direkt aus dem fehlgeschlagenen Michelson-Morley Experiment hergeleitet habe (S. 8).

Die nebeneinanderstehende Behandlung von tatsächlichen Paradoxa, anhand derer z. B. das Fehlen einer Querkontraktion behandelt wird, und von Scheinparadoxa, die sich meist aus der Nichtberücksichtigung der Relativität der Gleichzeitigkeit ergeben, könnte die Schüler verwirren (S. 22f). Es könnte für die Schüler schwierig werden, zu erkennen, weshalb es sich in einer Situation um ein Paradoxon handelt, das dementsprechend nicht vorkommen darf, und in einer anderen - zunächst genauso unrealistisch wirkenden - Situation nur um ein scheinbares Paradoxon, das aufgelöst werden kann. Dieses Problem ist zwar der speziellen Relativitätstheorie inhärent, jedoch könnte es sich möglicherweise abfedern lassen, indem die Behandlung tatsächlicher und scheinbarer Paradoxa stärker getrennt werden.

Die simplistische Sprache könnte das eben beschriebene Problem noch verstärken. An vielen Stellen gebraucht der Autor das Wort „absurd“ (S. 9, 10, 16, 18, 19, 25, 35). Dabei gebraucht er es sowohl um zunächst unglaublich erscheinende, aber tatsächlich auftretende relativistische Effekte zu beschreiben, als auch um tatsächlich widersprüchliche oder paradoxe Aussagen und Situationen hervorzuheben. Diese Vermischung könnte dazu führen, dass Schülern nicht immer klar ist, was ein realer Effekt und was ein tatsächlicher Widerspruch ist.

Einige Formulierungen und Abbildungen könnten die Vorstellung eines absoluten, erdfesten Systems begünstigen (S. 12, 19, 22, 26). Insbesondere könnte die Darstellung des Zwillingsparadoxons zu solchen Vorstellungen führen (aus den gleichen Gründen, die auch bei „Sextl Physik 8“ besprochen wurden).

Wie bereits besprochen wird die Vorstellung einer absoluten Bewegung (bzw. absoluter Ruhe) bewusst adressiert. Leider ist die Sprache im Buch jedoch nicht konsistent, und einige Formulierungen könnten eine solche Fehlvorstellung wiederum nähren (S. 15, 17, 20). Es wird wiederum vom „Bewegungszustand“, oder von „hohen Geschwindigkeiten“ gesprochen, ohne zu beschreiben relativ wozu die Bewegung stattfindet. Insbesondere bei der Behandlung der Zeitdilatation ist die Sprache ungünstig, da von einer „ruhenden Uhr“ und einer „bewegten Uhr“ gesprochen wird. Dabei wird nicht deutlich, dass die Situation auch umgekehrt betrachtet werden könnte. Erst bei der Behandlung des Zwillingsparadoxons auf Seite 19 wird dies klar.

Bei der Behandlung der relativistischen Scheinparadoxa schreibt der Autor, dass bei der Bewegung zweier Inertialsysteme relativ zueinander natürlich alle behandelten Effekte „gleichzeitig“ auftreten würden und die scheinbaren Paradoxien sich unter Miteinbeziehung der Relativität der „Gleichzeitigkeit“ auflösen lassen würden. Es würde hier definitiv ausreichen zu schreiben, dass alle Effekte auftreten, ohne das Wort „gleichzeitig“ zu benutzen, das, außer dem Potenzial Verwirrung zu stiften, in diesem Zusammenhang nichts bringt.

Für die Herleitung der Lorentztransformation (S. 36f) gilt die gleiche Kritik wie bei „Physik compact 8“.

Es wird explizit gezeigt, dass die relativistische Geschwindigkeitsaddition einer beliebigen Relativgeschwindigkeit ($v < c$) mit der Lichtgeschwindigkeit immer den Wert der Lichtgeschwindigkeit ergibt, alle Beobachter für diese also den gleichen Wert messen (S. 33). Dabei wird jedoch behauptet, dass dies die mathematische Begründung für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit liefert. Dabei handelt es sich jedoch um einen Zirkelschluss, da die Formel selbst aus der Annahme der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hergeleitet wurde. Es wird außerdem geschrieben, dass sich alle Effekte der speziellen Relativitätstheorie aus der Lorentztransformation mathematisch ableiten lassen (S. 37). Während dies sogar den Kern der SRT besser beschreibt, als die Darstellung in den anderen Schulbüchern, so handelt es sich aus Sicht der Schüler jedoch ebenso um einen Zirkelschluss, da die Lorentztransformation im Schulbuch ja aus den Effekten hergeleitet wurde. Hier wäre es wahrscheinlich hilfreich, anzufügen, dass die Lorentztransformation in der theoretischen Physik nicht aus den relativistischen Effekten abgeleitet wird.

Bei der Herleitung der Formel $E = m \cdot c^2$, die die Äquivalenz von Energie und Masse

beschreibt, behauptet der Autor, dass die Massenerhaltung auch im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie gelten müsse (S. 27). Das Newton'sche Konzept zur Erhaltung der Masse gilt jedoch in dieser Form nicht in der speziellen Relativitätstheorie [3].

5. Forschungsmethode

Es sollen sowohl das Vorwissen als auch das Wissen der Schüler nach dem Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie erhoben werden. Dabei werden die Vorstellungen, und darunter besonders die Fehlvorstellungen und deren Stabilität, untersucht. Da der Unterricht zur Relativitätstheorie ausschließlich in der 8. Klasse (12. Schulstufe) erfolgt und mit den Physiklehrkräften der Klassen abgesprochen wurde, dass das Thema zu Beginn des Schuljahres unterrichtet wird, wurde die Erhebung des Vorwissens am Ende des vorangegangenen Schuljahres durchgeführt, und die Untersuchung zu den Vorstellungen nach dem Unterricht direkt im Anschluss an diesen. Dazu wurden im Juni 2022 und im November 2022 Interviews mit Fragen zu konkreten Situationen durchgeführt, die darauf abzielten, die Vorstellungen zum Relativitätsprinzip, zur Geschwindigkeitsaddition, zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, zur Gleichzeitigkeit und zu Raum und Längen sichtbar zu machen.

Es wurde ein qualitativer Zugang gewählt, da nach Ansicht des Autors unzureichende Befunde vorlagen, um einen validen Fragebogen zu erarbeiten. In der qualitativen Forschung spielen wiederum sprachliche Erhebungsverfahren, also Interviews, eine große Rolle, da subjektive Bedeutungen kaum aus Beobachtungen abgeleitet werden können. Diese Bedeutungen werden am besten dadurch sichtbar, dass das Subjekt selbst zur Sprache kommt. In einem Gespräch können Missverständnisse bezüglich der Fragestellungen besser geklärt werden als in einem schriftlichen Erhebungsverfahren. Außerdem können durch Rückfragen auch durch den Interviewer missverstandene Antworten besser verstanden werden [May16].

Aus dem Ziel der Untersuchungen ergab sich als sinnvollste Erhebungsmethode ein problemzentriertes Interview. Dabei verwendet der Interviewer keinen starren Fragenkatalog, sondern einen Interviewleitfaden. Die Fragen werden nicht vorgelesen, sondern frei formuliert, und die Befragten formulieren ihre Antworten völlig frei und ohne Vorgaben. Dabei können je nach Gesprächsverlauf auch Fragen ausgelassen, oder ergänzende Fragen zusätzlich gestellt werden. Die Auswertung der Interviews erfolgt anschließend mit qualitativ-interpretativen Techniken. Somit handelt es sich um offene, halbstrukturierte, qualitative Verfahren [May16]. In den durchgeführten Interviews behandelten die im Interviewleitfaden formulierten Fragen konkrete Situationen, in denen Aspekte der speziellen Relativitätstheorie anschaulich angewendet werden können. Dabei wurden die Situationen im Gespräch anhand von Abbildungen illustriert. Der vollständige Interviewleitfaden findet sich in Anhang A, die einzelnen Teilbereiche sind auch, mit zusätzlichen Erläuterungen, bei der Auswertung der Interviewfragen zum jeweiligen Teilbereich ersichtlich.

Alle Interviews wurden auf Tonträger aufgezeichnet und anschließend in literarischer Umschrift transkribiert. Dabei wird der Dialekt (bzw. die Umgangssprache) mit dem gebräuchlichen Alphabet wiedergegeben [May16]. Dementsprechend folgen die Transkripte

oft nicht den grammatikalischen und stilistischen Regeln der Schriftsprache. Kürzere Pausen sind mit drei Punkten gekennzeichnet, ab einer Länge von 3 Sekunden ist die Länge der Pause vermerkt. Bei manchen Antworten war aufgrund des Tonfalls nicht zu erkennen, ob es sich um eine Aussage oder eine Frage handelte. Diese sind am Ende des Satzes mit (.) markiert. Weiters sind in den Transkripten Anmerkungen zu finden, die die Lesbarkeit des Textes erleichtern sollen. Diese folgen dabei logisch aus dem Gespräch und sind redundant. Die gesamten Interviewtranskripte der ersten Interviewrunde finden sich in Anhang B, jene der zweiten Runde in Anhang C.

Alle Schüler besuchen die gleiche Schule in Niederösterreich und meldeten sich freiwillig für die Interviews. Dabei wurden alle Schüler der 7. Klassen (11. Schulstufe) gefragt, ob sie teilnehmen möchten, sodass sich die Zusammensetzung der Gruppe der Interviewten rein aus dem Interesse der Schüler ergab. Dennoch ist das Verhältnis zwischen männlichen und weiblichen Schülern nicht stark verzerrt, und das Verhältnis zwischen Schülern, die das Realgymnasium besuchen, und den anderen ausgewogen. Im Realgymnasium haben die Schüler an dieser Schule mehr Physikunterricht (auch Laborunterricht), weshalb bei einem unausgewogenen Verhältnis ein falsches Bild entstehen könnte. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse wäre somit schwierig. Die Schüler, die nicht das Realgymnasium besuchen, teilen sich auf das sprachliche Gymnasium und einen bildnerischen Schwerpunkt auf. Zwischen diesen beiden Klassen ist keine besondere Diskrepanz bezüglich des Vorwissens im Fach Physik zu erwarten. Es wurde klar kommuniziert, dass es sich nicht um eine Leistungsfeststellung handelte, und das Interview keinen Einfluss auf die Note habe. Die Schüler wurden dementsprechend gebeten, nicht zu versuchen, richtige Antworten zu erraten, sondern das zu sagen, was ihnen in diesem Moment richtig oder sinnvoll schien.

Insgesamt wurden 13 Schüler interviewt. Alle wurden dabei jeweils zu allen Themenbereichen befragt. Die Schüler werden im Weiteren mit den Zahlen 1 bis 13 bezeichnet, wobei die Nummerierung der Reihenfolge der Interviews der ersten Interviewrunde folgt. Die Interviews begannen mit einer Frage zum Relativitätsprinzip, die dessen Grundidee zum Thema hatte. Die Vorstellungen zum Relativitätsprinzip selbst wurden auch noch durch weitere Fragen zu den anderen Themenbereichen erhoben. Danach wurden die Schüler zur Geschwindigkeitsaddition und zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit befragt. Es folgten Fragen zur Gleichzeitigkeit und zur Relativität von Raum und Längen. Die Dauer der Interviews der ersten Runde und die Dauer der einzelnen Teilbereiche sind in Tabelle 5.1 ersichtlich. Die Angaben wurden jeweils auf Minuten gerundet.

	Schulform	Alter	Relativitätsprinzip	Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	Gleichzeitigkeit	Relativität von Raum und Längen	Interview insgesamt
Schülerin 1	G	17	1	3	2	4	10
Schüler 2	G	17	1	6	4	4	15
Schülerin 3	RG	17	1	5	2	3	11
Schüler 4	RG	16	1	5	3	3	12
Schüler 5	RG	19	1	4	2	5	12
Schülerin 6	RG	17	1	4	3	4	12
Schülerin 7	RG	18	1	7	3	4	15
Schülerin 8	RG	17	1	6	3	5	15
Schüler 9	B	17	1	6	3	7	17
Schülerin 10	G	18	2	5	5	6	18
Schüler 11	RG	17	2	7	5	7	21
Schülerin 12	B	16	1	5	4	5	15
Schülerin 13	B	17	1	5	3	4	13
Dauer in Minuten							

Tabelle 5.1: Dauer der Interviews der ersten Interviewrunde in Minuten.

Die Anzahl der männlichen und weiblichen Schüler, sowie die Anzahl der Schüler aus den einzelnen Schulformen²⁵ ist in Tabelle 5.2 ersichtlich.

Schulform	B	G	RG	Σ
Männlich ♂	1	1	3	5
Weiblich ♀	2	2	4	8
Σ	3	3	7	13

Tabelle 5.2: Anzahl der befragten Schüler und Schülerinnen aus den verschiedenen Schulformen.

Die Altersverteilung der Schüler beim ersten und beim zweiten Interview findet sich in Tabelle 5.3.

Alter	16	17	18	19	Σ
1. Interview	2	8	2	1	13
2. Interview	0	8	4	1	13

Tabelle 5.3: Altersverteilung der befragten Schüler beim ersten und zweiten Interview.

Die Dauer der Interviews der zweiten Runde und die Dauer der einzelnen Teilbereiche sind in Tabelle 5.4 ersichtlich. Die Angaben wurden jeweils auf Minuten gerundet.

²⁵Dabei steht B für Gymnasium mit bildnerischem Schwerpunkt, G für Gymnasium mit sprachlichem Schwerpunkt und RG für Realgymnasium mit naturwissenschaftlichem Schwerpunkt.

	Schulform	Alter	Relativitätsprinzip	Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	Gleichzeitigkeit	Relativität von Raum und Längen	Interview insgesamt
Schülerin 1	G	18	1	4	2	3	10
Schüler 2	G	17	1	3	2	4	10
Schülerin 3	RG	17	1	3	7	3	14
Schüler 4	RG	17	1	3	2	3	9
Schüler 5	RG	19	1	3	3	6	13
Schülerin 6	RG	17	1	5	4	2	12
Schülerin 7	RG	18	2	2	4	4	12
Schülerin 8	RG	17	2	4	3	3	12
Schüler 9	B	18	1	4	5	8	18
Schülerin 10	G	18	1	5	2	5	13
Schüler 11	RG	17	1	4	5	4	14
Schülerin 12	B	17	1	3	6	5	15
Schülerin 13	B	17	2	6	4	6	18
Dauer in Minuten							

Tabelle 5.4: Dauer der Interviews der zweiten Interviewrunde in Minuten.

Die Auswertung erfolgte mit qualitativ-interpretativen Methoden. Die Auswertung zur Eingangsfrage zum Relativitätsprinzip findet sich für das erste Interview in Abschnitt 6.1 und für das zweite in Abschnitt 7.1. Die Auswertung der Fragen zur Geschwindigkeitsaddition und zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit findet sich für das erste Interview in Abschnitt 6.2 und für das zweite in Abschnitt 7.2. Die Auswertung der Fragen zur Gleichzeitigkeit findet sich für das erste Interview in Abschnitt 6.3 und für das zweite in Abschnitt 7.3. Die Auswertung der Fragen zur Relativität von Raum und Längen findet sich für das erste Interview in Abschnitt 6.4 und für das zweite in Abschnitt 7.4. Bei der Auswertung wurde davon ausgegangen, dass die Schüler zumindest aus ihrer Sicht sinnvolle Antworten geben, sodass versucht wurde, zunächst scheinbar sinnlose Antworten logisch konsistent zu interpretieren. Die meisten Antworten sind klar verständlich, der Gedankengang der Schüler ist leicht nachvollziehbar, und sie sind folglich leicht zu interpretieren. Alle Interpretationen sind mit Zitaten belegt, sodass sie nachvollzogen werden können.

6. Ergebnisse der 1. Interviewrunde

Im Folgenden ist die Auswertung der ersten Interviewrunde ersichtlich. Die Darstellung ist nach den Themenbereichen Relativitätsprinzip, Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Gleichzeitigkeit und Relativität von Raum und Längen geordnet. In den einzelnen Abschnitten wird zunächst der jeweils entsprechende Teil des Interviewleitfadens besprochen. Anschließend erfolgt die Auswertung, wobei Zitate zum Untermauern der Interpretationen angegeben werden. Am Ende jedes Abschnitts gibt es eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Eine Übersicht über alle Ergebnisse findet sich am Ende des Kapitels.

6.1. Relativitätsprinzip

Als Leitfaden für das Gespräch zum Relativitätsprinzip diene die folgende Frage.

Frage 1: Stell dir vor, du sitzt in einem Raumschiff A, und neben dir befindet sich ein weiteres Raumschiff B, das sich in die entgegengesetzte Richtung bewegt (Abb. 6.1). Du siehst, dass du dich relativ zum anderen Raumschiff bewegst. Nehmen wir an, nichts außer den beiden Raumschiffen ist sichtbar. Kannst du feststellen, ob sich dein Raumschiff bewegt, oder das andere, oder beide? Begründe deine Antwort!

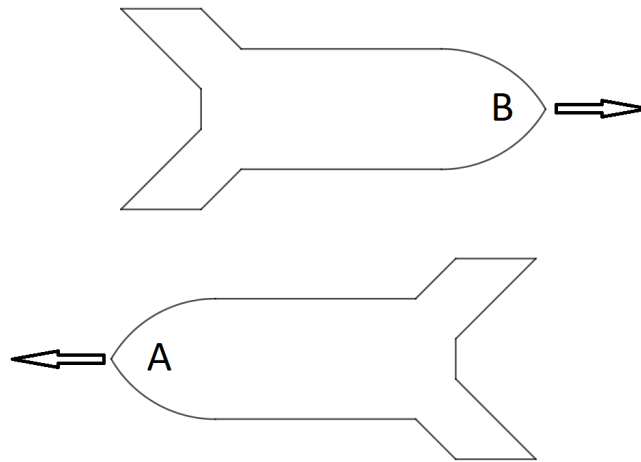


Abb. 6.1: Zu Frage 1. Die Raumschiffe A und B bewegen sich relativ zueinander.

Mit dieser Frage sollte überprüft werden, ob die Schüler das Relativitätsprinzip im gegebenen Fall richtig anwenden. Nach dem Relativitätsprinzip kann durch kein Experiment festgestellt werden, welches der Raumschiffe sich bewegt, sodass Bewegung keine absolute Größe sein kann.

6.1.1.1 Schülervorstellungen zum Relativitätsprinzip

Schülerin 1 ist zunächst unsicher, ob sie die Frage und die Situation richtig verstanden hat:

Zitat 1

Zitat 2

Zitat 3

Zitat 4

Schülerin 3 geht dabei nicht weiter auf einen möglichen Hintergrund ein und erkennt die Relativbewegung der Raumschiffe als zentrales Element der Situation.

Schüler 4 ist sich sicher, dass nicht festgestellt werden kann, welches der Raumschiffe sich bewegt:

1 *S4: Nein.*

Zitat 5

Seine Vorstellung vom Relativitätsprinzip ist in der gegebenen Situation brauchbar, eine tiefgehende Analyse seines Denkens ist jedoch nicht möglich.

Schüler 5 ist ebenfalls überzeugt davon, dass es nicht möglich ist festzustellen, welches der Raumschiffe sich bewegt:

1 *S5: Ahm, nein würd ich nicht sagen.*

Zitat 6

Auch seine Vorstellung vom Relativitätsprinzip ist in der gegebenen Situation angemessen. Auch hier ist keine tiefgehende Analyse seines Denkens möglich.

Schülerin 6 denkt bei der Frage danach, ob sie feststellen könne, welches der Raumschiffe sich bewegt, offenbar an ein mögliches, absolutes Bezugssystem:

1 *S6: ... man sieht nur das Raumschiff, sonst also ...*

2 *B: Sonst nichts.*

3 *S6: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) mmh, ich mein irgendwann muss das Raumschiff weg*
4 *sein und dann sieht man was. Aber so ich glaub, währenddessen könnt ich mir jetzt*
5 *nichts vorstellen, dass man eine Möglichkeit hat.*

Zitat 7

Sie identifiziert offenbar einen möglichen Hintergrund, den man sehen würde, sobald das andere Raumschiff die Sicht nicht mehr verdeckt, als absolutes Bezugssystem. Für die gegebene Situation ist ihre Vorstellung vom Relativitätsprinzip dennoch angemessen, da sie keines der beiden Raumschiffe als ausgezeichnet betrachtet.

Schülerin 7 meint, dass es nicht möglich ist festzustellen welches der Raumschiffe sich bewegt:

1 *S7: ... mmh ... ja, wenn ich gar nix sehe, ... dann nicht.*

Zitat 8

Somit ist ihre Vorstellung vom Relativitätsprinzip in der gegebenen Situation angemessen. Sie bringt weiters sogar ein Beispiel aus dem Alltag, das dies zu bestätigen scheint:

1 *S7: Mhm, das is wie im Zug beim Bahnhof.*

Zitat 9

Damit spielt sie offenbar auf das Gefühl eines Passagier in einem im Bahnhof stehenden Zug an, dass der Zug sich bewegt, wenn ein anderer Zug vorbeifährt. Dieses Beispiel kann bei vernachlässigbaren Beschleunigungen gut zur Veranschaulichung dienen. Schülerin 7 fährt jedoch fort:

- 1 *S7: Weil da schaut man dann noch einmal raus auf die, ob die Bäume sich jetzt bewegen,*
2 *oder ob der ... Zug ...*

Zitat 10

Diese Aussage könnte die Vorstellung eines absoluten erdfesten Bezugssystems zeigen, da aufgrund der Bewegung relativ zur Erde festgemacht wird, ob sich der Zug bewegt, oder nicht. Für die gegebene Situation ist ihre Vorstellung des Relativitätsprinzips aber brauchbar.

Schülerin 8 bringt bei der Beantwortung der Frage, ob sie feststellen könne, welches der Raumschiffe sich bewegt, zunächst Psychologie ins Spiel, erkennt jedoch, dass dies für die besprochene Situation nicht relevant ist:

- 1 *S8: ... Ahm ... das Erste was mir eingefallen ist ist Psychologie, aber ich glaube das ist*
2 *eher weniger was wir da gerade haben wollen, weil da haben wir das ja besprochen, dass*
3 *es immer eine Körperempfindung ist, aber wie ich feststellen kann, dass ... ich kann ja*
4 *nicht einmal einen anderen Anhaltspunkt finden, weil es ist alles schwarz ...*
5 *B: Mhm, ja.*
6 *S8: Hm ... wahrscheinlich kann man's ... nicht feststellen?*

Zitat 11

Bei ihrer Argumentation beschreibt Schülerin 8 das Fehlen eines Bezugspunktes als Problem. Dabei wird nicht klar, was für einen Bezugspunkt sie meint, es könnte sich jedoch um die Vorstellung eines äußeren, absoluten Bezugssystems handeln, relativ zu dem der Zustand der Bewegung oder Ruhe definiert ist. Sie ist sich auch bei ihrer Antwort nicht sicher, und es ist unklar, ob sie geraten hat. Dennoch ist ihre Vorstellung vom Relativitätsprinzip für die gegebene Situation adäquat. Es ist jedoch festzuhalten, dass es bei ihr offenbar keine tief verwurzelte Vorstellung des Relativitätsprinzips gibt.

Schüler 9 hat für die gegebene Situation eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips, es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass er ein für die Situation irrelevantes absolutes Bezugssystem für möglich hält:

- 1 *S9: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Also ich glaube auf jeden Fall, dass sich eines von*
2 *beiden bewegen muss ...*
3 *B: Mindestens. (lacht)*
4 *S9: ... ähm ... ich habe keinen Bezugspunkt, also kann ich nicht feststellen ob ich mich*
5 *bewege, oder ob Raumschiff B sich bewegt ... ahm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ...*
6 *ich kann auch keinen Bezugspunkt herstellen, oder aufbauen ... ja ich, also ich ich habe*
7 *keine Ahnung ... welches Raumschiff sich bewegt, ich kann nur feststellen, dass eines*
8 *sich bewegt, oder beide sich bewegen, beides ist möglich.*

Zitat 12

Er nennt sogar alle Möglichkeiten der Relativbewegung, jedoch erwähnt auch er einen fehlenden Bezugspunkt als Ursache dafür. Das könnte auf die Vorstellung eines absoluten Bezugssystems, relativ zu dem die Zustände der Ruhe und Bewegung definiert werden, hindeuten. In der besprochenen Situation ist er jedoch in der Lage das Relativitätsprinzip korrekt anzuwenden.

Schülerin 10 missversteht zunächst die Frage und begründet, dass es möglich wäre eine Relativbewegung festzustellen:

- 1 *S10: Ähm, ich glaube durch Lichter, die ... zum Beispiel Raumschiff A, oder Raumschiff B*
- 2 *entsenden, wenn ich hier zum Beispiel Raumschiff B beleuchte und ... sehe, dass diese*
- 3 *... wenn ich zum Beispiel Punkte, oder so hinleuchte und die sich dann ... dann nach*
- 4 *paar Sekunden, oder Minuten irgendwo anders befinden, dann könnte ich vielleicht, ähm,*
- 5 *vor allem feststellen, dass sie ... sich bewegen.*

Zitat 13

Bei erneuter Nachfrage danach, ob sie auch feststellen könne welches der Raumschiffe sich bewegt zeigt sich ein Grundverständnis des Relativitätsprinzips, aber auch ein Hinweis auf die Vorstellung eines absoluten Bezugssystems:

- 1 *S10: Ähm, ich glaube das würde ... schon, ... das wäre schon schwer, weil ... es im Weltall*
- 2 *komplett dunkel ist und wenn sowieso keine Sterne, oder irgendwas ist, dann ... wär's*
- 3 *glaube ich fast unmöglich.*

Zitat 14

Schülerin 10 spricht offenbar ebenso andere Objekte (z. B. Sterne) als Bezugspunkte für ein mögliches absolutes Bezugssystem an. Da es in der gegebenen Situation keine solchen Punkte gibt stellt sie jedoch fest, dass es kaum möglich sein dürfte, festzustellen, welches der Raumschiffe sich bewegt. Dabei wird die Vorstellung einer absoluten Bewegung, also der prinzipiellen Möglichkeit der absoluten Beantwortung der Frage offenbar als selbstverständlich betrachtet. Schülerin 10 schließt auch nicht aus, dass es möglich ist, festzustellen, welches der Raumschiffe sich bewegt. Für die gegebene Situation ist ihre Vorstellung des Relativitätsprinzips ausreichend, sie ist jedoch oberflächlich.

Schüler 11 bringt in einem längeren Gespräch das Gefühl bei einem von ihm gedrehten Stop Motion Film, den Luftzug in der U-Bahn und das Gefühl bei Beschleunigung ins Spiel:

- 1 *S11: Ja, was heißt ich sehe Bewegung? (lacht) Also ich sehe, dass es einfach ... kann ich*
- 2 *irgendwie feststellen, ob sich Raumschiff A bewegt, oder Raumschiff B ... (8 Sekunden*
- 3 *Pause; Anm.) ... boah, ähm ... Ich würde ... also instinktiv, hätte ich gesagt nein,*
- 4 *aber ich habe, äh ... einmal einen Stop Motion Film gedreht und anstatt, äh ... das*
- 5 *Auto, also das Matchboxauto zu bewegen, habe ich den Hintergrund bewegt ... und ...*
- 6 *ich meine, die ... natürlich haben sich die Reifen nicht gedreht, aber ... andererseits,*
- 7 *... ähm, war halt das schon ein ganz anderes Gefühl ... äh ... ja das ist eine sehr*
- 8 *unphysikalisch hier meine Antwort, sehr unbegründet ...*
- 9 *B: (lacht)*

10 *S11: ... aber ich glaube eigentlich ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, hm ... (3 Se-*
 11 *kunden Pause; Anm.) ... ja man spürt ja, wenn man in was ist, was bewegt ist, ja ein*
 12 *Luftzug, wenn man in der U-Bahn steht, aber wir sind ja im Weltall, das heißt es gibt*
 13 *keine Luft ... aber ...*
 14 *B: Und das was man spürt ist auch nur Beschleunigung, nicht wenn man schon eine Ge-*
 15 *schwindigkeit hat.*
 16 *S11: Stimmt auch wieder.*
 17 *B: Mhm.*
 18 *S11: Ähm ... Ist eigentlich das Lu- ist das Raumschiff mit Luft gefüllt eigentlich?*
 19 *B: Ja.*
 20 *S11: Ok.*
 21 *B: Aber wenn du ... zum Beispiel im Auto sitzt und fährst ... spürst du auch nicht, dass*
 22 *die Luft im Auto sich bewegt.*
 23 *S11: Ja, obwohl ... im Auto beschleunigt man ja immer.*
 24 *B: Ja.*
 25 *S11: Ähm, ok, das heißt ja, wenn wir mit Beschleunigung zu tun haben, wird man nach*
 26 *hinten gezogen, gegen die Fahrrichtung. Und ... na ich glaube einfach nicht. (lacht)*
 27 *Machen wir's einfach. Ich glaube es wird unmöglich sein.*

Zitat 15

Schüler 11 meint, dass das Gefühl bei einem Stop Motion Film, wenn der Hintergrund und nicht das Auto bewegt wird, ein anderes ist als im umgekehrten Fall. Dies könnte durch den Lichteinfall am Drehort zu erklären sein, denn prinzipiell stellt das von ihm genannte Beispiel eine gute Veranschaulichung des Relativitätsprinzips dar. Den Luftzug als Möglichkeit, festzustellen, welches der Raumschiffe sich bewegt, schließt er zunächst offenbar aus, fragt jedoch dann danach, ob das Raumschiff mit Luft gefüllt ist. Schließlich denkt er noch über das Gefühl bei Beschleunigung nach, und entscheidet sich letztendlich dafür, dass nicht festgestellt werden kann, wer sich bewegt. Schüler 11 hat demnach keine tief verankerte Vorstellung des Relativitätsprinzips. Ihm ist offenbar nicht bewusst, dass ein Luftzug nur durch geöffnete Fenster bzw. ein Ventilationssystem entsteht, und nicht durch die Luft im Inneren der U-Bahn. Weiters ist ihm wohl nicht klar, dass Beschleunigung in der gegebenen Situation keine Rolle spielt. Es könnte auch sein, dass diese Unklarheit aufgrund der Formulierung der betreffenden Frage im gegebenen Gespräch entstanden ist, da er jedoch auch nicht nachfragt, ist ihm ein substanzieller Unterschied zwischen einer beschleunigten und einer unbeschleunigten Bewegung offenbar nicht bewusst. Insgesamt lässt sich daraus schließen, dass es keine tief verwurzelte Vorstellung des Relativitätsprinzips gibt. Nach einer kurzen Erläuterung akzeptiert er in Übereinstimmung mit seiner eigenen Vermutung, dass in der besprochenen Situation nur die Relativbewegung von Bedeutung ist.

Schülerin 12 formuliert offenbar eine Vorstellung eines absoluten Bezugssystems, das für die gegebene Situation jedoch nicht relevant ist:

1 *S12: ... Hm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... nein, weil das rundherum sich ja ... also,*
 2 *weil sich, weil ich rundherum nichts sehen kann und keinen ... Punkt festmachen kann,*
 3 *woran ich sehen kann, ob sich, eben, ob jetzt ich mich bewege, oder ob sich das andere*
 4 *Fahrzeug.*

Zitat 16

Es wirkt so, als würde Schülerin 12 annehmen, dass Bewegung relativ zu einem äußeren, absoluten Bezugssystem festgemacht werden müsste, von dem sie jedoch keinen Bezugspunkt zur Verfügung hat. Folglich ist ihre Vorstellung vom Relativitätsprinzip für die gegebene Situation adäquat, da sie die Raumschiffe als gleichwertig betrachtet.

Schülerin 13 spricht zunächst davon, dass der Raum relativ sei²⁶:

1 *S13: ... Hm ... Naja, wenn ... Raum, wenn der Raum relativ ist, dann kommt's, glaube*
 2 *ich, immer auf den Betrachter an.*

Zitat 17

Sie erläutert diese Aussage anschließend und zeigt dabei ein ausreichendes Grundverständnis des Relativitätsprinzips:

1 *S13: Das heißt, wenn ich im Raumschiff A bin ..., dann bewegt sich mein Umfeld für mich*
 2 *nicht und ich denke, dass sich das andere bewegt, daher ... glaube ich ist das dann so*
 3 *eine Illusion und daher weiß ich nicht was sich bewegt, also ich kann's nicht feststellen.*

Zitat 18

Schülerin 13 gibt zunächst korrekt die Idee eines Inertialsystems wieder, und konstatiert auch, dass es nicht möglich ist, festzustellen, welches der Raumschiffe sich bewegt. Insbesondere bemerkt sie (Zitat 17), dass es auf den Betrachter ankommt. Sie hat also eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips. Was genau sie damit meint, dass es sich um eine Illusion handle, ist unklar.

6.1.2. Zusammenfassung

Alle 13 befragten Schüler haben zumindest für die gegebene Situation eine adäquate Vorstellung des Relativitätsprinzips. Dabei lassen sich bei 6 der 13 Schüler Anzeichen für die Vorstellung eines absoluten Bezugssystems und absoluter Ruhe und Bewegung erkennen, sie erkennen jedoch die Bedeutungslosigkeit eines solchen Systems für die gegebene Situation. Bei 3 Schülern waren die Antworten zu knapp bzw. fehlten Begründungen für ihre Antworten, sodass eine tiefgehende Analyse ihres Denkens nicht möglich ist. Ein Schüler bringt die Gravitation ins Spiel, wobei nicht klar wird, auf welche Art sie ihm helfen würde, die Frage zu beantworten. Ein Schüler denkt über Effekte wie den Luftzug, oder das Gefühl bei Beschleunigung nach, erkennt jedoch nicht den Unterschied zwischen einer beschleunigten und einer unbeschleunigten Bewegung.

²⁶Obwohl diese Aussage das Gegenteil vermuten lässt, gab Schülerin 13 zu Protokoll, sich nicht auf das Interview vorbereitet, sich also nicht mit dem Thema beschäftigt zu haben.

6.2. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Als Leitfaden für das Gespräch zur Geschwindigkeitsaddition und zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit dienten die folgenden Fragen.

Frage 1: Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit $v = 100000 \text{ km/s}$. Auf beiden Raumschiffen befinden sich Messgeräte, die die Geschwindigkeit von Dingen in Raumschiff B messen. Betrachten wir einen in Raumschiff B sitzenden Passagier (Abb. 6.2).

- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff B für den in B sitzenden Passagier?
- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff A für den in B sitzenden Passagier?

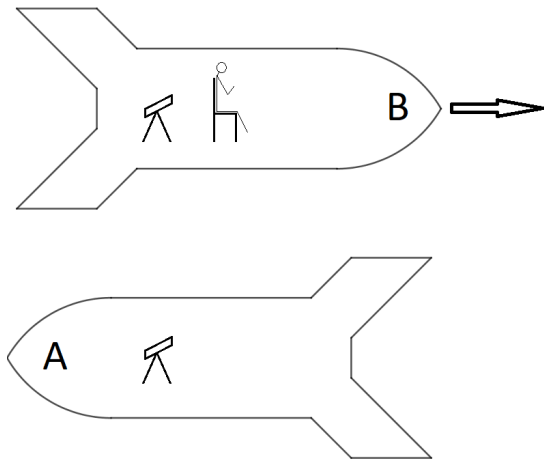


Abb. 6.2: Zu Frage 1. Die Geschwindigkeit eines in Raumschiff B sitzenden Passagiers wird von Messgeräten in beiden Raumschiffen bestimmt.

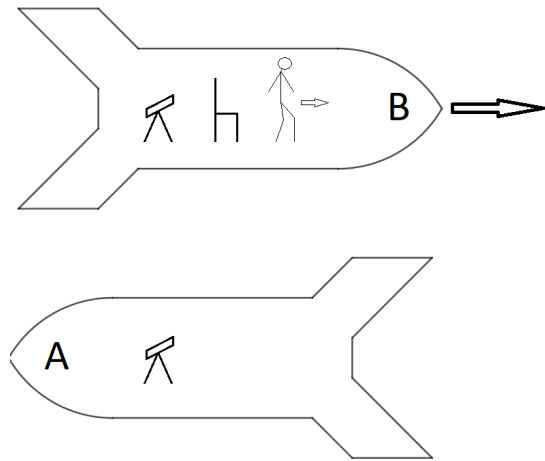


Abb. 6.3: Zu Frage 2. Die Geschwindigkeit eines in Raumschiff B gehenden Passagiers wird von Messgeräten in beiden Raumschiffen bestimmt.

Frage 2: Der Passagier steht auf und geht nun in die Richtung, in die sich Raumschiff B bewegt (Abb. 6.3).

- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff B für den in B gehenden Passagier?
- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff A für den in B gehenden Passagier?

Frage 3: Im Raumschiff B befindet sich eine Lampe (Lichtgeschwindigkeit $c = 300000 \text{ km/s}$), die in die Richtung leuchtet, in die sich Raumschiff B bewegt (Abb. 6.4). Die Lampe wird eingeschaltet.

- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff B für die Lichtfront?
- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff A für die Lichtfront?

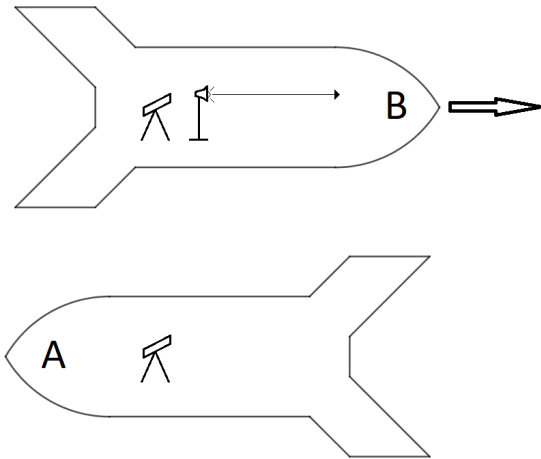


Abb. 6.4: Zu Frage 3. Die Geschwindigkeit eines von einer Lampe auf Raumschiff B ausgesandten Lichtstrahls wird von Messgeräten auf beiden Raumschiffen bestimmt.

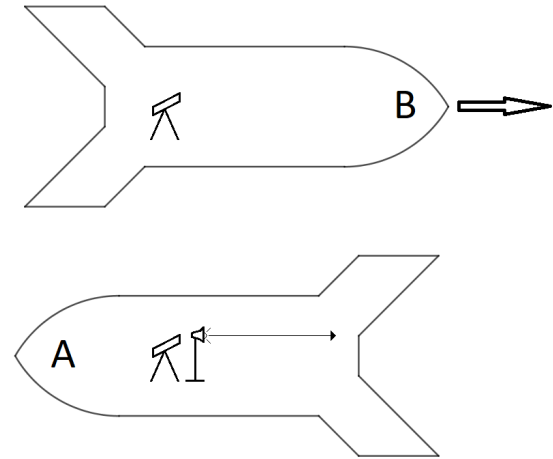


Abb. 6.5: Zu Frage 4. Die Geschwindigkeit eines von einer Lampe auf Raumschiff A ausgesandten Lichtstrahls wird von Messgeräten auf beiden Raumschiffen bestimmt.

Frage 4: In Raumschiff A befindet sich ebenfalls eine solche Lampe, die ebenfalls in die Richtung leuchtet, in die sich Raumschiff B bewegt (Abb. 6.5). Die Lampe wird eingeschaltet.

- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff A für die Lichtfront?
- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff B für die Lichtfront?

Frage 5: Tatsächlich haben Messungen ergeben, dass in allen Situationen beide Messgeräte den gleichen Wert für die Geschwindigkeit der Lichtfront messen – unabhängig von der Relativgeschwindigkeit der Raumschiffe. Wie stehst du dazu?

Die Fragen 1 und 2 erheben, ob die Schüler die klassische Geschwindigkeitsaddition bei niedrigen Geschwindigkeiten korrekt anwenden können. Sie sollten insbesondere als Einstieg zur Geschwindigkeitsaddition in einer einfacheren Situation dienen, um die Grundlagen zu klären. Dabei wurde die Formulierung der Geschwindigkeit des Passagiers relativ zu dem Raumschiff, in dem er sich befindet, einfach gehalten und nicht über einen Messwert definiert, da untersucht wird, ob es den Schülern gelingt, seine Bewegung relativ zum Messgerät zu beschreiben.

Die Fragen 3 und 4 testen, ob die Schüler die klassische Geschwindigkeitsaddition auch für Licht anwenden würden, und ob sie dies korrekt²⁷ tun würden. Bei Frage 3 würde das Gerät auf Raumschiff A eine Geschwindigkeit von 400.000 km/s für das Licht messen und bei Frage 4 das Gerät auf Raumschiff B eine Geschwindigkeit von 200.000 km/s . Nach der speziellen Relativitätstheorie messen in beiden Fällen alle Geräte einen Wert von 300.000 km/s ²⁸.

Frage 5 testet schließlich die Bereitschaft der Schüler, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit anzunehmen. Damit sollte auch getestet werden, ob ein Bruch zur klassischen Physik erkannt wird, oder nicht.

6.2.1. Auswertung der Interviews zur Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

6.2.1.1 Schülervorstellungen zur Geschwindigkeitsaddition bei niedrigen Geschwindigkeiten

Bei den Fragen zur klassischen Geschwindigkeitsaddition zeigen sich bei einigen Schülern Hinweise auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung. Die meisten Schüler beherrschen die klassische Geschwindigkeitsaddition im gegebenen Kontext gut.

Schülerin 1 zeigt bei Frage 1 ein gutes Verständnis für Inertialsysteme und Geschwindigkeitsaddition. Bei der Frage nach der vom Messgerät in Raumschiff B gemessenen Geschwindigkeit erwartet sie zwar zunächst den Wert der Relativgeschwindigkeit:

1 *S1: Ja diese 100. Also.*

Zitat 19

Nach dem Hinweis, dass sich dieses Gerät und der Passagier im selben Raumschiff befinden, korrigiert sie sich jedoch:

1 *S1: Ja die Geschwindigkeit von... Ja, ne warte. Die... Null, weil, die anderen Dinge bewegen*
2 *sich ja nicht.*

Zitat 20

Danach vermutet sie für die Geschwindigkeit, die das Gerät in Raumschiff A misst, den korrekten Wert:

1 *S1: Ja diese hundert... tausend, was sie gesagt haben.*

Zitat 21

Nach einem Missverständnis zu Beginn gibt sie also die richtigen Antworten. Bei Frage 2 nennt sie für die vom Gerät in B gemessene Geschwindigkeit den richtigen Wert:

²⁷Gemeint ist im Rahmen der klassischen Physik.

²⁸Für eine ausführliche Behandlung siehe Kapitel 3, insbesondere Abschnitt 3.3.1.

1 *S1: Die 4 km/h(.?)*

Zitat 22

Bei der Messung des Geräts in Raumschiff A erwartet sie ebenfalls den richtigen Wert, obwohl es ihr nicht gelingt dies richtig zu formulieren:

1 *S1: Die 1004 km, oder...*

2 *B: Die 100.000.*

3 *S1: Ja, 100.004 km/h.*

Zitat 23

Schülerin 1 beantwortet also alle Fragen im Sinne der klassischen Geschwindigkeitsaddition korrekt.

Schüler 2 hat zunächst große Probleme mit dem Verständnis der Frage:

1 *S2: Mhm. Und die Geschw... Geschwindigkeit in welcher sich B von A entfernt(.?)*

2 *B: Er misst nur die Geschwindigkeit des Passagiers, ...*

3 *S2: Ach so!*

4 *B: ... der sich auf dem gleichen Raumschiff wie es selbst befindet. ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Mit anderen Worten: Wie schnell bewegt sich der Passagier relativ zum Geschwindigkeitsmessgerät?*

7 *S2: Ach so. ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... Was ist noch die Frage dazu?*

Zitat 24

Nach einer Wiederholung der Fragestellung vermutet er, dass die Relativgeschwindigkeit als Messwert aufscheinen würde:

1 *S2: Ja wahrscheinlich die 100.000, diese, die 100.000 km/h.*

Zitat 25

Schüler 2 wird als erläuterndes Beispiel die Frage gestellt, wie sich ein in einem Zug sitzender Passagier von ihm entfernt, wenn er selbst auch im Zug sitzt. Dabei erkennt er den Sachverhalt richtig:

1 *S2: Gar nicht.*

Zitat 26

Die Umlegung auf den in der Frage behandelten Fall gelingt jedoch nur unvollständig. Er behauptet, der Passagier bewege sich genau gleich wie das Messgerät:

1 *S2: Genau gleich.*

Zitat 27

Bei der anschließenden Frage, welchen Wert dann das Messgerät misst, ist Schüler 2 zunächst unsicher, ob wirklich die Geschwindigkeit der Person gemessen wird:

1 *S2: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm. (lacht) ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Er misst wirklich nur die Person?*

Zitat 28

1 *S3: Von dem Passagier?*

Zitat 35

Nach einer Klarstellung, dass es um die Geschwindigkeit des Passagiers geht, erkennt sie im Verlauf eines kurzen Gesprächs den richtigen Wert:

1 *S3: Ja der Passagier ist glaub ich gar nicht schnell, oder(.?) Nur ...*

2 *B: Wenn er sitzt.*

3 *S3: ... nur das Raumschiff.*

4 *B: Ja, also würd-, was würdest du sagen was misst das Gerät jetzt für ihn?*

5 *S3: Ja, null m/s.*

Zitat 36

Auf den zweiten Teil der Frage antwortet sie ebenso korrekt:

1 *S3: Eben diese 100.000 ... m/s.*

Zitat 37

Schülerin 3 hat also mit der in Frage 1 beschriebenen Situation keine Probleme. Die Geschwindigkeit, die das Gerät auf Raumschiff B für den gehenden Passagier misst, sagt sie richtig voraus:

1 *S3: Ich glaub die 4 km/h(.?)*

Zitat 38

Ihre Antwortet deutet zwar Unsicherheit an, sie hat jedoch den Sachverhalt intuitiv richtig erkannt. Probleme ergeben sich erst beim zweiten Teil der Frage, wenn die Situation vom Standpunkt von Raumschiff A betrachtet wird:

1 *S3: Ich glaub wieder die 100.000 von vorher, weil er sich ja mit dem Raumschiff bewegt,*
2 *oder(.?)*

3 *B: Mhm und die 4 km/h die er noch geht, spielen die eine Rolle?*

4 *S3: Ich glaub nicht ... ich glaub nur, dass, dass also ich glaub, dass nur das Raumschiff*
5 *gemessen wird, weil er sich ja drinnen befindet und ich glaub das Geschwindigkeitsmes-*
6 *sungsgerät, das misst nur die Geschwindigkeit von dem außen, also, also kann man im*
7 *anderen Raumschiff ...*

8 *B: Na er möchte tatsächlich wissen wie schnell bewegt sich der (Passagier in Raumschiff B;*
9 *Anm.) relativ zu mir.*

10 *S3: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... Keine Ahnung. (lacht) Ok.*

Zitat 39

Schülerin 3 nimmt also zunächst an, dass das Gerät in Raumschiff A nicht in der Lage ist, die Geschwindigkeit des Passagiers zu messen, sondern nur die Geschwindigkeit des Raumschiffs, in dem sich dieser befindet. Auf die Frage, ob sich an der Relativgeschwindigkeit eines Passagiers im Zug relativ zum Bahnsteig etwas ändert, wenn er in Fahrtrichtung geht, entgegnet sie, er bewege sich dann noch schneller:

1 *S3: Noch schneller eigentlich.*

Zitat 40

Nach der Aufforderung diese Beobachtung auf die Situation mit den Raumschiffen zu übertragen, meint sie die Geschwindigkeiten müssten addiert werden:

- 1 *S3: Würde man das dann einfach zusammenrechnen, die Geschwindigkeiten(.?)*
2 *B: Inwiefern zusammenrechnen?*
3 *S3: Also, dass man ... quasi die Geschwindigkeit von außen misst und die von innen und*
4 *dann zusammen, also, rechnen.*

Zitat 41

Aus dem Zusammenhang wird klar, dass sie meint, die Geschwindigkeiten müssten addiert werden. Schülerin 3 zeigt zwar mit ihren Antworten auf die ersten Teile der Fragen ein gutes Verständnis für das Prinzip eines Inertialsystems, jedoch unterliegt sie zunächst dem Irrtum, dass die Geschwindigkeit eines Passagiers in einem am Messgerät vorbeibewegten Raumschiff nicht gemessen werden könne. Dies ist auch mit der Antwort auf Frage 1b konsistent. Nach der Aufklärung dieses Missverständnisses gelangt sie mit etwas Hilfe zu den richtigen Resultaten. Ihre Intuition zur klassischen Geschwindigkeitsaddition ist gut, das Konzept ist jedoch nicht sehr gefestigt.

Schüler 4 zeigt zunächst die Vorstellung einer absoluten Bewegung:

- 1 *S4: Wie schnell das Raumschiff fährt ... fliegt.*

Zitat 42

Bei einer analogen Fragestellung zu einer Situation, bei der er in einem Zug sitzt und einen ebenfalls im Zug sitzenden Passagier betrachtet erkennt er den Sachverhalt richtig:

- 1 *S4: Gleich ... heißt, dieselbe.*
2 *B: Entfernt sich der von dir, oder gar nicht?*
3 *S4: Nein.*

Zitat 43

Nach einer Klarstellung, dass eine dementsprechende Messung von dem Messgerät in Frage 1 vorgenommen wird, kann er die korrekte Geschwindigkeit die dieses Gerät misst nicht vorhersagen:

- 1 *S4: Die Entfernung.*
2 *B: Na welche Geschwindigkeit misst der?*
3 *S4: Vom Passagier.*
4 *B: Ja und wie schnell ist das? Für einen sitzenden Passagier?*
5 *S4: So schnell wie das Raumschiff.*
6 *B: Aber jetzt würdest du doch sagen, wenn jemand im Zug vor dir sitzt und der Zug fährt mit*
7 *200 km/h Richtung Wien ...*
8 *S4: Würd der Passagier nicht mit 200 km/h fahren.*

Zitat 44

Auf die Nachfrage, ob der Passagier sich also nicht so schnell von ihm entfernen würde antwortet Schüler 4, dass er gar keine Geschwindigkeit habe:

1 *S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... heißt der Passagier hat gar keine Geschwindigkeit.*
Zitat 45

Damit meint er offenbar, dass die Geschwindigkeit 0 km/h ²⁹ beträgt. Bei der Frage danach was das Gerät in Raumschiff A für diesen Passagier misst missversteht er den Begriff der Relativgeschwindigkeit:

1 *S4: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... einmal das was das Raumschiff (B; Anm.) fährt plus*
2 *das was Raumschiff A fährt(.?)*
Zitat 46

Diese Antwort zeigt an, dass er wahrscheinlich das Konzept der Relativgeschwindigkeit nicht richtig verinnerlicht hat. Nach einer Erläuterung dazu erkennt Schüler 4 den Zusammenhang jedoch korrekt:

1 *S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... die 100.000 ... m/s.*
Zitat 47

Nach Klärung dieser grundsätzlichen Fragen beantwortet Schüler 4 die Frage 2 wesentlich schneller korrekt:

1 *S4: 4 km/h.*
Zitat 48

Nach einer Rückfrage dazu, ob bei Frage 2b erneut die Geschwindigkeit des Passagiers gemeint ist und einer Bestätigung dieser Annahme findet Schüler 4 bis auf die Einheit den richtigen Wert sofort:

1 *S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) die 1.000 m/s plus die 4 km/h.*
Zitat 49

Schüler 4 hat zunächst große Schwierigkeiten damit, zu erkennen, was genau gemessen wird, und hat offenbar mit dem Konzept der Relativgeschwindigkeit Probleme. Nach Klärungen dazu gelingt es ihm jedoch, die klassische Geschwindigkeitsaddition korrekt anzuwenden.

Schüler 5 meint zunächst ebenfalls, dass das Gerät die Geschwindigkeit von Raumschiff B relativ zu Raumschiff A messen würde:

1 *S5: Ahm, naja dieselbe Geschwindigkeit wie das Raumschiff fliegt, also 100.000 km/s.*
Zitat 50

Eine analoge Situation, bei der er in einem Zug sitzt und gefragt wird, wie sich ein ebenfalls im Zug sitzender Passagier relativ zu ihm bewegt, beurteilt er richtig:

1 *S5: Also relativ zu mir, ahm ... gar nicht.*
Zitat 51

²⁹Einheit bei diesem Wert beliebig.

Nach einer Klarstellung, dass das Messgerät ebenso die Geschwindigkeit des Passagiers relativ zu sich selbst misst meint Schüler 5, dass es nichts anzeigen würde:

- 1 *S5: Na dann würde es auch gar nichts anzeigen.*
2 *B: Also null.*
3 *S5: Also null, ja.*

Zitat 52

Auf Die Frage danach, welche Geschwindigkeit das Gerät in Raumschiff A für diesen Passagier messen würde, entgegnet er nach einer Klarstellung, dass es um die Geschwindigkeit des Passagiers und nicht die des Raumschiffs geht, dass es die Relativgeschwindigkeit messen würde:

- 1 *S5: Ahm, ja dann eben die Geschwindigkeit die das Raumschiff hat weil's ja ... sich im*
2 *Raumschiff befindet, diese Person.*

Zitat 53

Für die Situation, in der der Passagier in Richtung Spitze des Raumschiffs geht, stellt Schüler 5 für das Messergebnis des Geräts in Raumschiff B den richtigen Wert fest:

- 1 *S5: Die 4 km/h die die Person geht.*

Zitat 54

Bei der gleichen Situation, betrachtet aus dem anderen Raumschiff, bemerkt er:

- 1 *S5: Ja ich würd' sagen um ... 4 km/h mehr da sie ja zusätzlich zu der ... Raumschiffbewegung*
2 *sich noch bewegt, also...*

Zitat 55

Auch bei Schüler 5 deutet die erste Antwort auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung hin, die vom Messgerät erfasst wird. Nach einer Klarstellung, dass um die Relativbewegung zwischen Messgerät und zu messendem Objekt geht, löst Schüler 5 die Frage richtig, und wendet auch die klassische Geschwindigkeitsaddition korrekt an.

Schülerin 6 erkennt die Bedeutung der Tatsache, dass sich das Gerät und der sitzende Passagier im selben Inertialsystem befinden:

- 1 *S6: Also das ... die sind beide im Raumschiff?*
2 *B: Genau.*
3 *S6: Dann is logischerweise keine Bewegung, weil das is ja, gerade ...*

Zitat 56

Auch die Bedeutung der Relativbewegung schätzt sie richtig ein:

- 1 *S6: Eben diese ... 100.000 km/s.*

Zitat 57

Bei der Frage nach dem Messergebnis des Geräts in Raumschiff B, wenn der Passagier in Richtung Spitze des Raumschiffs geht meint Schülerin 6, dass ein Wert von 4 km/h angezeigt würde:

1 *S6: 4 km/h.*

Zitat 58

Für die gleiche Situation aus Raumschiff A betrachtet sagt sie den korrekten Wert voraus:

1 *S6: Also es bewegt sich gegeneinander, das heißt die 4 km/h plus die ... 100.000 km/s.*

Zitat 59

Schülerin 6 hat eine gute Vorstellung von der klassischen Geschwindigkeitsaddition.

Schülerin 7 stellt zunächst die Frage, ob sich das Messgerät innerhalb oder außerhalb des Raumschiffs befindet:

1 *S7: ... ja ist das (Messgerät; Anm.) ... drinnen, oder draußen?*

Zitat 60

Nach einer Bemerkung, dass es sich im Raumschiff befinde, sagt sie als Messwert die Relativgeschwindigkeit voraus:

1 *S7: Drinnen, so wie's abge-, ok. Ähm ... ja dann wahrscheinlich von ... Raumschiff B(?.)*

2 *B: Wie meinst du?*

3 *S7: Ja, ... wenn das ... Messgerät im Raumschiff B ist, dann ...*

Zitat 61

Auf eine erneute Nachfrage danach, welche Geschwindigkeit es für den sitzenden Passagier misst, antwortet sie unsicher:

1 *S7: Der Passagier ... bewegt sich ja gar nicht, aber das Raumschiff bewegt sich. Kommt halt*

2 *drauf an wie das ...*

Zitat 62

Nach einer erneuten Klarstellung, dass es nur um die Relativbewegung zwischen Messgerät und Passagier geht erklärt sie, dass sich der Passagier relativ zum Messgerät nicht bewege:

1 *S7: Ah, also gar nicht.*

Zitat 63

Auf die Frage, was das Gerät in Raumschiff A messen würde, antwortet Schülerin 7 richtig:

1 *S7: Wie schnell sich die ... Rakete, oder das Raumschiff B bewegt(?.)*

Zitat 64

Sie beantwortet die Frage korrekt, jedoch in unsicherem Tonfall. Für die Messung der Geschwindigkeit des gehenden Passagiers durch das im gleichen Raumschiff positionierte Gerät gibt sie das richtige Ergebnis an:

1 *S7: 4 km/h(?.)*

Zitat 65

Die Geschwindigkeitsaddition bereitet Schülerin 7 jedoch erhebliche Probleme:

- 1 S7: Die ... Geschwindigkeit vom Raumschiff B, also diese 1300 irgendwas(?.)
 2 B: Und die 4 km/h die der da noch in die gleiche Richtung geht, machen die einen Unter-
 3 schied, oder nicht?
 4 S7: Nein.
 5 B: Überhaupt nicht?
 6 S7: Ja für ... das Messgerät A nicht.
 7 B: Ja es misst ja nicht wie schnell das Raumschiff B ist, sondern es misst wirklich wie schnell
 8 der da (der Passagier; Anm.) ist.
 9 S7: Aso, ja dann ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... hmm, wahrscheinlich schon(?.)
 10 B: Was glaubst du, wie würde sich das auswirken?
 11 S7: ... ähm, er ist wahrscheinlich ... für Messgerät A schneller ... als für Messgerät B, aber
 12 langsamer als die Rakete B(?.)

Zitat 66

Schülerin 7 erkennt keine direkte Verbindung zwischen der Relativbewegung der Raumschiffe und der Bewegung des Passagiers relativ zu Raumschiff B mit dem gefragten Wert. Sie nimmt offenbar an, dass es nicht möglich ist, dass sich der Passagier relativ zum Raumschiff A schneller bewegt als das Raumschiff, auf dem er sich befindet. Nach einem Beispiel mit einem vorbeifahrenden Zug, in dem sich ein Passagier in Fahrtrichtung bewegt, meint sie auf die Frage, ob dieser sich relativ zu ihr schneller, oder langsamer bewege als der Zug:

- 1 S7: Ja wahrscheinlich schneller. Aber ... schneller.
 2 B: Da geht der noch irgendwie schneller aus deinem Blickfeld.
 3 S7: Ja stimmt.
 4 B: Und was würde dann ... das hier (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) für den gehenden
 5 Passagier messen?
 6 S7: Dass er schneller geht.
 7 B: Um wie viel ... würde er quasi schneller sein als nur das Raumschiff? ... (4 Sekunden
 8 Pause; Anm.) ... wenn er 4 km/h geht.
 9 S7: Die 4 km/h.

Zitat 67

Mithilfe eines Beispiels gelingt Schülerin 7 die Lösung der Aufgabe. Ihre Probleme bei der letzten Fragestellung, sowie die unsicheren Antworten bei den vorangegangenen Situationen lassen darauf schließen, dass die klassische Geschwindigkeitsaddition nicht gut verstanden wurde.

Schülerin 8 meint zunächst, dass das Messgerät für den im gleichen Raumschiff sitzenden Passagier die Relativgeschwindigkeit der Raumschiffe messen würde:

- 1 S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Die Geschwindigkeit mit dem sich das ... Flugzeug,
 2 die Rakete, oder so, bewegt(?.)

Zitat 68

Nach der Behandlung der Frage wie sich ein im Zug sitzender Passagier relativ zu ihr bewegt, wenn sie selbst im Zug sitzt antwortet sie auf die Frage nach der Geschwindigkeit die das Gerät in Raumschiff B misst richtig:

- 1 *S8: Die Geschwindigkeit wie schnell er sich wegbewegt, ... wenn er sich wegbewegt.*
 2 *B: Und ... wenn er sitzt? Wie schnell ist das dann?*
 3 *S8: Null.*

Zitat 69

Für die Bewertung der Situation aus dem anderen Raumschiff gibt sie ebenfalls eine richtige Einschätzung ab:

- 1 *S8: ... 100.000 ... km/s.*

Zitat 70

Im Fall dass der Passagier in Richtung der Spitze des Raumschiffs B geht erkennt sie den korrekten Messwert:

- 1 *S8: 4 km/h.*

Zitat 71

Bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff A fragt sie zunächst danach, ob wirklich die Geschwindigkeit des Passagiers gemeint sei und nennt nach einer Bestätigung, abgesehen von der Einheit, den richtigen Wert:

- 1 *S8: 100.000 und 4 km/h pro Sekunde. (lacht)*

Zitat 72

Nach einer anfänglichen Schwierigkeit die auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung hindeuten könnte löst Schülerin 8 alle Fragen korrekt und wendet auch die klassische Geschwindigkeitsaddition richtig an.

Schüler 9 sieht zunächst die Relativgeschwindigkeit zwischen den Raumschiffen als Messwert des Geräts in Raumschiff B für den im selben Raumschiff sitzenden Passagier an. Daraufhin schätzt er die Situation korrekt ein:

- 1 *S9: Die Geschwindigkeit relativ zum Raumschiff A, also ...*
 2 *B: Na, es misst die Geschwindigkeit von sich selbst, relativ zum ...*
 3 *S9: Ach so!*
 4 *B: ... Passagier.*
 5 *S9: Ach so, wie sich das von mir ..., ach so, ja dann ... null, weil der Passagier bewegt sich*
 6 *für das Ding ja nicht, weil sie beide ... in der gleichen ... Einheit praktisch sind, die*
 7 *sich schnell bewegt.*

Zitat 73

Nach dem Einwand, dass es um die Bewegung des Passagiers relativ zum Messgerät gehe beschreibt er die Situation korrekt und zeigt eine gute Vorstellung eines Inertialsystems. Bei der Behandlung der Frage nach dem Ergebnis des Messgeräts in Raumschiff A zeigt Schüler 9 ein Missverständnis zum Begriff der Relativgeschwindigkeit, beurteilt die Situation nach einer Klarstellung aber richtig:

1 *S9: Also ... sofern es ihn sieht wird es die Geschwindigkeit von ... Raumschiff ... B mes-*
 2 *sen, aber man muss dabei ... bedenken, dass Raumschiff A sich ja auch bewegt, das*
 3 *heißt, wenn ... Raumschiff A sich in die Gegenrichtung bewegt, dann wird die Bewegung*
 4 *automatisch schneller werden, das heißt es wird eine schnellere Bewegung für B messen.*
 5 *B: Und genau das meinen wir mit der Relativgeschwindigkeit. Die fasst quasi beide Bewegun-*
 6 *gen auf jeden Fall zusammen.*
 7 *S9: Ja, voll.*
 8 *B: Das heißt wenn die (Relativgeschwindigkeit; Anm.) 100.000 km/s ist ...*
 9 *S9: Und die (Geschwindigkeit von Raumschiff A; Anm.) 100.000, dann haben wir 200.000*
 10 *km/s.*
 11 *B: Ah, wir sagen schon, das ist schon die Relativgeschwindigkeit ...*
 12 *S9: Ach so!*
 13 *B: ... die ist schon zusammengefasst 100.000, was misst denn dann das Gerät (auf Raum-*
 14 *schiff A; Anm.) für den Passagier?*
 15 *S9: Das Gerät für den Passagier, das hat 100.000, das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.)*
 16 *ist ruhig, oder bewegt sich auch?*
 17 *B: Ja, wie gesagt, das ist zusammengefasst, wir wissen nur ... das Raumschiff (A; Anm.)*
 18 *bewegt sich relativ zu dem Gerät jedenfalls mal mit 100.000 ...*
 19 *S9: Dann misst's genau diese Geschwindigkeit von 100.000, ja.*

Zitat 74

Dabei wird klar, dass Schüler 9 die Bedeutung des Begriffs „Relativgeschwindigkeit“ noch nicht voll erfasst hat, die Geschwindigkeitsaddition unter diesen falschen Voraussetzung jedoch sehr wohl korrekt durchgeführt hätte. Nach einer Klärung des Begriffs gelangt er zum korrekten Ergebnis. Dabei ist bei seiner Bemerkung nach der Klärung der Relativgeschwindigkeit unklar, ob er noch von einer Bewegung des Messgeräts relativ zu Raumschiff A ausgeht, oder einen Zustand absoluter Ruhe meint. Nach der Klärung dieser Grundlagen erkennt er in der Situation, in der der Passagier in Richtung der Spitze von Raumschiff B geht, schnell den vom Gerät in Raumschiff B gemessenen Wert:

1 *S9: 4 km/h.*

Zitat 75

Auch die Geschwindigkeitsaddition gelingt ihm bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff A sofort:

1 *S9: Der misst jetzt hun-, also, äh, die Relativgeschwindigkeit plus die 4 km/h, oder s- ...,*
 2 *das das misst den ... den Menschen, oder?*
 3 *B: Ja.*
 4 *S9: Dann mischt's, äh, misst's beides zusammen, also 4 km/h plus die Relativgeschwindigkeit.*

Zitat 76

Insgesamt beherrscht Schüler 9 die klassische Geschwindigkeitsaddition gut, hat jedoch noch Schwierigkeiten mit dem Begriff der Relativgeschwindigkeit. Außerdem gibt es Hinweise auf die Vorstellung von absoluter Bewegung und Ruhe.

Schülerin 10 erkennt die Bedeutung der Tatsache, dass es sich bei Raumschiff B um ein Inertialsystem handelt:

- 1 *S10: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Wahrscheinlich ... gar nicht, weil es mit B bewegt,*
 2 *oder, äh, sich mit B bewegt und ... nicht relativ zu A, ... sondern es ist in B inbegriffen*
 3 *quasi ... und dann ... ändert es seine Geschwindig-, Geschwindigkeit, also Position gar*
 4 *nicht, weil es in B ist, ... finde ich.*

Zitat 77

Für die Betrachtung aus Raumschiff A erkennt sie den richtigen Messwert:

- 1 *S10: Genauso wie B, also 100.000 km/s, waren das, glaube ich.*

Zitat 78

Bei der Behandlung der Situation mit dem in Raumschiff B gehenden Passagier äußert Schülerin 10 zunächst Bedenken, ob das Messgerät in Raumschiff A dessen Geschwindigkeit exakt bestimmen kann:

- 1 *S10: ... Ahm ... wahrscheinlich 4 Kilom-, km/h, weil ... es relativ zu dieser ... Position,*
 2 *ähm ... gemessen wird ... und A würde dann ... noch immer B, ah, glaube ich, messen,*
 3 *weil es nicht ... nur auf Personen fokussiert werden kann.*
 4 *B: Aha, das Messgerät ist tatsächlich so gut im Raumschiff A ...*
 5 *S10: Ach so, ok.*
 6 *B: dass es auch ... das mitberücksichtigt. Was würde das dann messen für diese Person*
 7 *insgesamt?*
 8 *S10: Ich glaube dann, diese 100.000 und noch diese 4 ... Kilometer noch dazu, ... also km/h.*

Zitat 79

Nach der Klärung zu den Messgeräten wendet Schülerin 10 die klassische Geschwindigkeitsaddition korrekt an. Sie hat eine gute Vorstellung von diesem Konzept.

Schüler 11 erkennt zunächst nicht, dass das Messgerät die Bewegung eines Körpers relativ zu sich selbst misst:

- 1 *S11: Naja 100.000 km, oder wie, wie viel waren das? 100.000 km/s(.?)*

Zitat 80

Auf die Frage, wie sich ein im Zug sitzender Passagier relativ zu ihm bewegen würde, wenn er ebenfalls im Zug sitzt, antwortet er korrekt und überträgt das Ergebnis sofort richtig auf die gegebene Situation:

- 1 *S11: Hm, nein, gar nicht, also ... also welches Messgerät misst ihn?*
 2 *B: Das Messgerät auf Raumschiff B.*
 3 *S11: Ach so, dann ist es null und das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) misst 100.000.*

Zitat 81

Nach der Veranschaulichung löst er die Situation sofort korrekt auf und ebenso gleich den zweiten Teil der Frage. Er hat eine gute Vorstellung vom Begriff der Relativgeschwindigkeit. In der Situation, in der der Passagier in Raumschiff B geht, erkennt er den Zusammenhang richtig:

- 1 *S11: Das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) misst 4 km/h, das (Gerät auf Raumschiff A;*
 2 *Anm.) 1.004, oder ... wie viel das waren.*

Zitat 82

Schüler 11 wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition sofort richtig an, er hat sie gut verinnerlicht. Bei seiner ersten Antwort ist nicht klar, ob die Vorstellung einer absoluten Bewegung vorliegt, oder ob er missverstanden hat, um den Wert welchen Messgeräts es gerade geht. Seine weiteren Äußerungen lassen keine Vorstellung einer absoluten Bewegung erkennen, sodass ein Missverständnis die plausible Erklärung darstellt.

Schülerin 12 nimmt zunächst die Relativbewegung zwischen den Raumschiffen als Messwert des Geräts in Raumschiff B für den in Raumschiff B sitzenden Passagier an:

- 1 *S12: ... Hm, die Geschwindigkeit auf die sich Raumschiff A auf den Passagier bewegt ... (.)*

Zitat 83

Nach einer Klärung dazu, dass die Geschwindigkeiten von Körpern relativ zu den Geräten gemessen werden, erkennt sie den richtigen Wert:

- 1 *S12: ... Also sie bewegen sich gleichzeitig, beziehungsweise ... gar nicht zueinander.*

Zitat 84

Für die Betrachtung der Situation aus Raumschiff A stellt sie sofort den richtigen Wert fest:

- 1 *S12: ... Ähm, naja die Geschwindigkeit die Raumschiff B auf Raumschiff A hat.*

Zitat 85

Auf die Frage danach, welchen Wert das Gerät in Raumschiff B für den im selben Raumschiff gehenden Passagier misst antwortet Schülerin 12 richtig:

- 1 *S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... 4 km/h(.?)*

Zitat 86

Bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff A erkennt sie den korrekten Messwert:

- 1 *S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... die Geschwindigkeit von Raumschiff B die*
 2 *sich auf Raumschiff A bewegt plus ... 4 km/h.*

Zitat 87

Schülerin 12 hat eine gute Vorstellung von der klassischen Geschwindigkeitsaddition, ihre erste Reaktion auf die erste Frage könnte jedoch ein Hinweis auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung sein.

Schülerin 13 geht trotz ihrer vorherigen Bemerkung, dass der Raum relativ sei, offenbar von einer absoluten Bewegung aus:

1 S13: ... Boah ... ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.), naja es ... das bewegt sich mit
2 huntertau-, 100.000 km/h.

Trotzdem sieht sie offenbar das Messgerät und den Passagier als in einem System verortet. Auf die Frage danach, ob sich der Passagier vom Messgerät entfernt, antwortet sie:

Dabei kann sie diese Aussage nicht in den Messwert 0 km/h übersetzen. Nach einem Messwert gefragt nennt sie 100.000 km/h relativ zu A:

Dabei bezieht sie diesen Wert auf die Bewegung relativ zu Raumschiff A. Folglich wird die Frage gestellt, welchen Wert das Gerät in Raumschiff A für diesen Passagier messen würde. Dabei erkennt sie den Messwert sofort richtig:

Bei der erneuten Frage nach dem Ergebnis des Messgeräts in Raumschiff B wird ihr der Widerspruch bei gleichem Messwert bewusst:

Nachdem offenbar ein grundlegendes Missverständnis geklärt wurde, erkennt sie für die Situation, in der das Gerät auf Raumschiff B die Geschwindigkeit eines in diesem gehenden Passagiers misst deutlich schneller:

Auch die Betrachtung der Situation aus Raumschiff A löst sie zufriedenstellend:

Insgesamt zeigt sich bei Schülerin 13 ein gutes Verständnis der klassischen Geschwindigkeitsaddition, jedoch ist offenbar eine Vorstellung von absoluter Bewegung vorhanden.

6.2.1.2 Schülervorstellungen zur Geschwindigkeitsaddition bei der Lichtgeschwindigkeit

Schülerin 1 antwortet richtig auf die Frage nach der vom Messgerät in Raumschiff B gemessenen Geschwindigkeit des von der Lampe in Raumschiff B ausgesandten Lichtes:

1 *S1: Ja die 300.000.*

Zitat 95

Bei der Frage nach dem vom Gerät in Raumschiff A gemessenen Wert wendet sie die klassische Geschwindigkeitsaddition korrekt an:

1 *S1: Die 300.000 plus ... die Geschwindigkeit von dem (Raumschiff B, Relativgeschwindigkeit;*
2 *Anm.).*

Zitat 96

In der Situation, in der die Lampe auf Raumschiff A platziert ist, erkennt Schülerin 1 den vom Gerät in Raumschiff A gemessenen Wert richtig:

1 *S1: (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja genau das gleiche, oder(?) Wieder die 300.000...*

Zitat 97

Die Betrachtung der Situation vom Standpunkt des Messgeräts in Raumschiff B bereitet ihr zunächst aufgrund der im Vergleich zum vorherigen Beispiel verschiedenen Bewegungsrichtung leichte Probleme. Dabei ist zunächst nicht klar, wie ihre erste Antwort gemeint ist:

1 *S1: Ähm ... die 300.000 vom Licht ... und auch die Geschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit;*
2 *Anm.).*
3 *B: Wird's was Größeres jetzt als die Lichtgeschwindigkeit messen, oder was kleineres? Weil*
4 *sie bewegen sich ... in die gleiche Richtung.*
5 *S1: Aso, wart', dann was Kleineres. Weil sie ja in die gleiche Richtung gehen, oder?*

Zitat 98

Aus dem Gespräch wird klar, dass sie zunächst die Geschwindigkeiten wieder addiert hätte. Nach einem Hinweis auf die Bewegungsrichtung wendet sie die klassische Geschwindigkeitsaddition jedoch korrekt an. Vom Standpunkt der klassischen Physik beantwortet sie die Fragen also richtig.

Schüler 2 ist zunächst unsicher, ob es um die Geschwindigkeit der Lampe, oder des Lichts geht, antwortet nach Klärung dieser Frage aber richtig:

1 *S2: Für das Licht, oder für die Lampe?*
2 *B: Für das Licht.*

3 *S2: Ja, die ... 300.000 m/s.*

Zitat 99

Anschließend löst er die Aufgabe bei Betrachtung aus dem Raumschiff A vom Standpunkt der klassischen Physik richtig:

1 *S2: Ich würde wieder sagen die 100.000 km/h plus die 300.000 m/s.*

Zitat 100

Bei der Betrachtung der Situation, in der sich die Lampe auf Raumschiff A befindet, hat Schüler 2 zunächst Probleme mit dem Begriff der Relativgeschwindigkeit:

1 *S2: Raumschiff A bewegt sich aber nicht(.?)*

Zitat 101

Nach einer erneuten Klärung, dass es in der betrachteten Situation nur um die Relativbewegung geht, erkennt er den korrekten Messwert:

1 *S2: Die Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 102

Die Betrachtung der Situation aus Raumschiff B bereitet ihm keine Probleme:

1 *S2: ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... Ah so, wieder die ... äh, hm ... (6 Sekunden Pause;*
2 *Anm.) ... ähm die äh Lichtgeschwindigkeit abz ... äh, äh Lichtgeschwindigkeit abzüglich*
3 *der, der Raumschiffgeschwindigkeit(.?)*

Zitat 103

Die klassische Geschwindigkeitsaddition wird von Schüler 2 in allen Situationen verständig eingesetzt.

Schülerin 3 erkennt (abgesehen von der Einheit) den korrekten Messwert, den das Gerät auf Raumschiff B für die Geschwindigkeit des von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandten Lichtes anzeigt:

1 *S3: 300.000 m/s(.?)*

Zitat 104

Die Frage zur Betrachtung aus Raumschiff A löst sie ebenfalls vom Standpunkt der klassischen Physik richtig auf:

1 *S3: Die Geschwindigkeit mit der sich das Raumschiff bewegt und die von dem Licht der Lampe*
2 *zusammengerechnet(.?)*

Zitat 105

Den Messwert des Geräts in Raumschiff A für das von der Lampe in Raumschiff A ausgesandte Licht erkennt Schülerin 3 richtig:

1 *S3: Wieder die 300.000.*

Zitat 106

Die klassische Geschwindigkeitsaddition gelingt ihr allerdings bei den gegebenen Bewegungsrichtungen nicht korrekt:

Schülerin 3 kann die klassische Geschwindigkeitsaddition demnach nur in manchen Situationen korrekt anwenden.

S4: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... also rein logisch Lichtgeschwindigkeit.
Zitat 108

1 *S4: Die Lichtgeschwindigkeit plus ... das ... wie schnell das Raumschiff fährt.*
Zitat 109

1 *S4: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... die Lichtgeschwindigkeit minus dem was ... Raum-*
2 *schiff A fährt.*

Zitat 110

1 *S4: Dann nur die Lichtgeschwindigkeit.* Zitat 111

1 *S4: Die Lichtgeschwindigkeit minus ... dem Raumschiff, was aber keinen Sinn ergibt, weil*
2 *das Raumschiff nicht rückwärtsfährt.*

Zitat 112

Offensichtlich ist er mit seiner vom Standpunkt der klassischen Physik aus richtigen Antwort auf die Frage unzufrieden. Dabei ist festzuhalten, dass sich Raumschiff A in der gegebenen Situation relativ zu Raumschiff B entgegen der Ausbreitungsrichtung des Lichts bewegt, was bei Anwendung der klassischen Geschwindigkeitsaddition zum von Schüler 4 genannten Ergebnis führt. Das Abnehmen der Lichtgeschwindigkeit in dieser Betrachtung interpretiert er fälschlicherweise als Rückwärtsfahren eines der Raumschiffe. Wie genau er zu dieser Anschauung gelangt, ist unklar. Schüler 4 wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition verständig an, hat aber offenbar Probleme mit dem Begriff der Relativgeschwindigkeit und die Vorstellung einer absoluten Bewegung.

Schüler 5 erkennt korrekt den vom Gerät auf Raumschiff B für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht gemessenen Wert:

1 *S5: Ja die ... Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 113

Die Geschwindigkeitsaddition wendet er bei der Betrachtung aus Raumschiff A im Sinne der klassischen Physik korrekt an:

1 *S5: Ja wieder ..., also die zwei Geschwindigkeiten ahm addiert, also vom Raumschiff und*
2 *vom Licht.*

Zitat 114

Auch wenn die Lampe sich auf Raumschiff A befindet erkennt er den richtigen Messwert:

1 *S5: Die Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 115

Bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff B gelangt er nach kurzem Nachdenken zur richtigen Schlussfolgerung im Sinne der klassischen Physik:

1 *S5: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... na die ...*
2 *Lichtgeschwindigkeit abzüglich der Geschwindigkeit vom Raumschiff.*

Zitat 116

Schüler 5 wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition in allen Situationen verständig an.

Schülerin 6 erkennt den vom Gerät auf Raumschiff B für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht gemessenen Wert richtig:

1 *S6: Diese ... 300.000 km/s.*

Zitat 117

Auch die korrekte Betrachtung der Situation aus Raumschiff A im Sinne der klassischen Physik gelingt ihr nach kurzem Nachdenken:

- 1 *S6: Äh, ähm (lacht) ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... wieder beides hätt' ich gesagt, also*
 2 *wieder zusammengerechnet, die 1.000 und die 3.000.*

Zitat 118

Auch wenn die Lampe sich auf Raumschiff A befindet nennt sie den richtigen Messwert für das Gerät auf Raumschiff A:

- 1 *S6: Äh, wieder die 300.000 km/s.*

Zitat 119

Die Betrachtung der Situation aus Raumschiff B löst nach kurzem Nachdenken wiederum korrekt im Sinne der klassischen Physik auf:

- 1 *S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... das müsst es sein die 300.000 minus den 100.000(.?)*

Zitat 120

Schülerin 6 wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition in allen besprochenen Fällen verständig an.

Schülerin 7 erkennt den Wert, den das Gerät auf Raumschiff B für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht misst, richtig:

- 1 *S7: Diese ... Lichtgeschwindigkeit, die drei Komma ... irgendwas.*

Zitat 121

Bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff A zeigt sie Unsicherheit, löst die Aufgabe jedoch auf Grundlage der vorangegangenen Aufgabe mit dem gehenden Passagier korrekt:

- 1 *S7: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja wieder das sch-, ... also wieder schneller(.?)*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S7: Und ... wahrscheinlich wieder ... um die ... um diesen Zahlenwert mehr.*

Zitat 122

Befindet sich die Lampe auf Raumschiff A, so gelingt es Schülerin 7 den Wert des Messgeräts auf Raumschiff A für das von der Lampe ausgesandte Licht vorherzusagen:

- 1 *S7: Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 123

Die klassische Geschwindigkeitsaddition gelingt ihr bei den nun vom vorangegangenen Beispiel verschiedenen Bewegungsrichtungen nicht mehr:

- 1 *S7: Die ... das Gleiche wie beim andern(.?)*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S7: Nur ... in die andere Richtung.*
 4 *B: Und ... würde das heißen es ... würde das Licht schneller, oder langsamer wahrnehmen*
 5 *als jetzt nur Lichtgeschwindigkeit? Weil es ... bewegt sich in die gleiche Richtung wie*
 6 *das Licht.*

7 *S7: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja irgendwann einmal sieht man das ja nicht mehr*
 8 *deswegen, weil's hinter einem ist.*

Zitat 124

Auch nach einem Gespräch darüber, wie schnell einem Fahrer auf der Autobahn, der mit 130 km/h fährt ein an ihm mit 150 km/h vorbeifahrendes Auto erscheint, gelingt ihr die Lösung nicht:

1 *S7: Also wieder diese ... wie bei dem vorher.*

Zitat 125

Schülerin 7 addiert also die Relativgeschwindigkeit und die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Richtung der Relativbewegung. Sie hat das Konzept der klassischen Geschwindigkeitsaddition offenbar nicht tief verankert.

Schülerin 8 erkennt den Messwert, den das Gerät in Raumschiff B für das von der Lampe in Raumschiff B ausgesandte Licht misst, korrekt:

1 *S8: 300.000 km/s.*

Zitat 126

Sie zeigt bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff A zunächst Unsicherheiten, die sie bei der Betrachtung des gehenden Passagiers nicht zum Ausdruck gebracht hatte:

1 *S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... ja ...*
 2 *B: Wie hast du's denn beim Passagier gelöst?*
 3 *S8: Vorher habe ich ja dazugerechnet, dann habe ich mir gedacht vielleicht ist es ja trotzdem*
 4 *gleichbleibend, also, dass es immer noch nur die Geschwindigkeit vom Flugzeug ist, des-*
 5 *wegen wanke ich gerade, ob es nicht immer noch nur 100.000 ist, weil ... es bewegt sich*
 6 *ja vorwärts ... mit 100.000 und das Licht bewegt sich ja ... mit und nicht zusätzlich.*

Zitat 127

Nach einer Veranschaulichung mit einem in einem, relativ zum Bahnsteig bewegten, Zug gehenden Passagier löst sie die Aufgabe richtig:

1 *S8: Naja, dann wird's wahrscheinlich ... 400.000 sein.*

Zitat 128

Den Messwert des Geräts in Raumschiff A für das von der Lampe in Raumschiff A ausgesandte Licht erkennt Schülerin 8 sofort richtig:

1 *S8: ... 300.000 km/s.*

Zitat 129

Die bei der Betrachtung aus Raumschiff B nun anderen Verhältnisse bei den Bewegungsrichtungen stellen Schülerin 8 vor Probleme:

1 *S8: 300.000 km/s ... obwohl ... es (Raumschiff B; Anm.) geht ja hundert ...*

Zitat 130

Nach einem kurzen Gespräch zu den Bewegungsrichtungen stellt sie keinen Bezug zwischen der vom Gerät in Raumschiff B gemessenen Geschwindigkeit und der Relativgeschwindigkeit mehr her:

- 1 *S8: Ich glaub ich da, auch 300.000, weil sich's (das Messgerät; Anm.) ja mitbewegt.*
- 2 *B: Na es (das Messgerät; Anm.) bewegt sich ja nicht mit dem Licht mit, sondern mit dem*
- 3 *Raumschiff (B; Anm.) und das ...*
- 4 *S8: Ach so.*
- 5 *B: ... ist jetzt die Frage.*
- 6 *S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaube ...*
- 7 *ich glaube ich bleibe bei 300.000(?) (lacht)*

Zitat 131

Damit nennt sie den nach der Relativitätstheorie korrekten Messwert, es ist jedoch aus dem Gesprächsverlauf klar, dass dies zufällig und nicht aufgrund von Vorwissen geschieht. Schülerin 8 kann die klassische Geschwindigkeitsaddition nicht in allen Situationen verständig anwenden und zweifelt auch an den Ergebnissen zu den Fragen, in denen sie die Geschwindigkeiten richtig addiert hat. Die klassische Geschwindigkeitsaddition ist bei ihr also nicht gut verankert.

Schüler 9 erkennt den Messwert, den das Gerät auf Raumschiff B für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht erhält:

- 1 *S9: Für das Licht ... einfach nur die Lichtgeschwindigkeit von ... da nach da.*

Zitat 132

Er löst die Geschwindigkeitsaddition bei der Betrachtung aus Raumschiff A im Sinne der klassischen Physik zunächst korrekt:

- 1 *S9: Äh, Lichtgeschwindigkeit plus Relativgeschwindigkeit.*

Zitat 133

Anschließend meldet Schüler 9 jedoch Bedenken an, da es sich bei Licht um ein Teilchen handeln würde. Nach einer Klarstellung, dass es im Rahmen der betrachteten Situation unerheblich ist, ob Licht als Welle oder Teilchen betrachtet wird, bleibt er jedoch bei seiner Antwort. Es ist nicht klar, welche Änderung sich für ihn durch die Überlegung, dass Licht ein Teilchen ist, ergeben hätte. Anschließend äußert Schüler 9 noch eine Erwartung:

- 1 *S9: ... Wobei sich Licht wahrscheinlich irgendwie anders verhält.*
- 2 *B: (lacht) Was du ... woraus schließt?*
- 3 *S9: Ähm, ... weil Licht immer komisch ist, ähm ... das haben wir jetzt gelernt im letzten*
- 4 *halben Jahr. (lacht)*

Zitat 134

Offenbar lässt die Behandlung des Lichts im Rahmen des Unterrichts zur Quantenphysik ihn bereits überraschende Effekte erwarten. Befindet sich die Lampe auf Raumschiff A, so sagt er den korrekten Messwert des Geräts auf Raumschiff A vorher:

5 *S10: ... Ich würde ... ähm, von A Licht abziehen. ... Also wie schnell sich das bewegt und*
 6 *minus ... Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 140

Es würde sich ihrer Meinung nach ein Wert von -200.000 km/s ergeben. Dies wurde im Rahmen der Klassischen Physik der Geschwindigkeit von Raumschiff B relativ zum Licht entsprechen, also der Betrachtung der Situation aus dem System eines Photons³⁰. Insgesamt beherrscht sie die klassische Geschwindigkeitsaddition gut. Die Antwort auf die letzte Frage könnte auf Schwierigkeiten mit den Vorzeichen in manchen Situationen hindeuten.

Schüler 11 macht sich Gedanken über die Natur des Lichts und versucht eine Vorstellung des Lichts für die Messung zu etablieren. Dabei beantwortet er Frage 3 im Sinne der klassischen Physik richtig:

1 *S11: ... Das Licht ... hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... also das ... wir, wir messen*
 2 *einfach im Prinzip ein, ein, boah wie heißt das? (lacht) Oje, jetzt, jetzt ist, jetzt ist das*
 3 *peinlich, öh, ähm ... also einfach ein Photon vom Licht.*
 4 *B: Quasi. Kann man sich so vorstellen.*
 5 *S11: Ok. Wir messen einfach ein Photon, das heißt ... das geht von da nach da, 300.000*
 6 *km. Das ist in Relation ... und die logischste Antwort wäre einfach 300.000 von dem*
 7 *(Gerät auf Raumschiff B; Anm.) ... und dann da das, das Raumschiff (AB; Anm.) sich*
 8 *auch in die gleiche Richtung auch bewegt wäre das 400.000, aber es muss wahrscheinlich*
 9 *irgendwo einen Haken geben, also ... (lacht)*

Zitat 141

Bei der Behandlung der Situation, in der sich die Lampe in Raumschiff A befindet, zeigt Schüler 11 zunächst eine Fehlvorstellung bezüglich der Relativgeschwindigkeit:

1 *S11: Das Raumschiff A steht, oder?*

Zitat 142

Dies deutet auf eine Vorstellung einer absoluten Bewegung hin. Anschließend löst er den ersten Teil der Aufgabe korrekt, hat jedoch Schwierigkeiten bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff B:

1 *S11: Naja, also, weil, die sind ja im selben Raumschiff, das heißt sie müssen sich gleich*
 2 *bewegen, ah ... misst das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) 300.000 und das hier, ...*
 3 *ah, das bewegt sich in dieselbe Richtung, das heißt es ist ja im Prinzip wie parallel, da*
 4 *ist es ja egal ob es jetzt im Raumschiff ist, oder draußen, das heißt es misst 400.000.*

Zitat 143

Nach der Behandlung eines anschaulichen Beispiels zu nebeneinander auf der Autobahn fahrenden Autos löst Schüler 11 die Aufgabe in einem Gespräch zur Übertragung auf den besprochenen Fall richtig:

³⁰Eine solche Betrachtung wäre im Rahmen der klassischen Physik möglich, ergibt jedoch in der Relativitätstheorie keinen Sinn, da Photonen kein Ruhesystem haben.

1 *S11: Ähm ... das Raumschiff bewegt sich nach da ... und ist schneller ... hm ... naja es*
2 *wird schneller wirken, aber es ist, ... es ist ja eigentlich gleich, oder(?.) Weil sie ...*
3 *B: Licht bewegt sich mit 300.000 hier her ...*
4 *S11: Ja.*
5 *B: ... und das Raumschiff in die gleiche Richtung mit 100.000 daneben.*
6 *S11: Ja, dann ist es 400.000, ... wenn das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) das (Licht;*
7 *Anm.) misst, weil obwohl, oh, warte. Das Licht bewegt ... dann wird's 200.000, oder?*

Zitat 144

Die Aussage, dass eine Geschwindigkeit schneller wirke, aber eigentlich gleich sei, stützt die Annahme, dass er die Vorstellung einer absoluten Bewegung hat. Schüler 11 stellt klar, dass es sich bei seiner ersten Antwort um einen Denkfehler gehandelt habe:

1 *S11: Ja! Nein, ja, ok ... Denkfehler, natürlich ... wären es 200, 1000 ... 200.000, ja, das*
2 *wird das ...*

Zitat 145

Insgesamt hat er ein solides Verständnis der klassischen Geschwindigkeitsaddition, wobei er Unsicherheiten zeigt. Die Vorstellung einer absoluten Bewegung kann vermutet werden.

Schülerin 12 erkennt den Messwert, den das Gerät auf Raumschiff B für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht erhält (abgesehen von der Einheit) richtig:

1 *S12: ... 300 km/h pro Sekunde(?.)*

Zitat 146

Anschließend wendet sie die klassische Geschwindigkeitsaddition für die Betrachtung der Situation aus Raumschiff A richtig an:

1 *S12: ... Ähm ... die Geschwindigkeit von Raumschiff B auf Raumschiff A plus die 300 km/h*
2 *pro Sekunde(?.)*

Zitat 147

Nach einigem Nachdenken nennt sie auch den korrekten Messwert (abgesehen von der Einheit) für die Geschwindigkeit, die das Gerät auf Raumschiff A für das von der Lampe auf Raumschiff A ausgesandte Licht erhält:

1 *S12: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... auch 300*
2 *km/h pro Sekunde.*

Zitat 148

Bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff B begeht sie den gleichen Fehler wie Schülerin 8:

1 *S12: ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... also Geschwindigkeit von ... A die auf B wirkt ...*
2 *logischerweise würde ich jetzt sagen minus die 300 km/h pro Sekunde, aber da bin ich*
3 *mir nicht sicher.*

Zitat 149

Schülerin 13 nennt den korrekten Wert für das Messergebnis des Geräts auf Raumschiff B für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht:

Die Betrachtung aus Raumschiff A stellt Schülerin 13 zunächst vor Probleme:

Nach einer Nachfrage, wie sie die Situation mit dem gehenden Passagier gelöst habe, führt sie die Geschwindigkeitsaddition (abgesehen von den Einheiten) jedoch im Sinne der klassischen Physik korrekt aus:

Nach einem kurzen Gespräch über die Einheit nennt sie den richtigen Messwert für die Situation, dass das Gerät in Raumschiff A die Geschwindigkeit des von der Lampe in Raumschiff A ausgehenden Lichtes misst:

Anschließend löst sie auch die Aufgabe zur Betrachtung der Situation aus Raumschiff B korrekt:

Schülerin 13 hat zwar zunächst Schwierigkeiten, die sie bei der Betrachtung des gehenden Passagiers nicht gehabt hatte, löst anschließend jedoch alle Aufgaben richtig. Sie hat ein gutes Verständnis der klassischen Geschwindigkeitsaddition. Dabei zeigt sie leichte Unsicherheiten.

Schülerin 1 nimmt der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ohne emotionale Reaktion hin.

- 1 *S1: ... Ja das heißt halt, dass das Licht immer quasi gleich schnell ist.*
 2 *B: Und auch egal wie sich die Lichtquelle bewegt.*
 3 *S1: ... bewegt ja, Licht bleibt Licht.*

Zitat 155

Weshalb die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sie nicht überrascht, obwohl sie zuvor die Aufgaben zur Geschwindigkeitsaddition im Sinne der klassischen Physik richtig gelöst hatte, ist unklar.

Schüler 2 meint, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit keinen Sinn ergebe:

- 1 *S2: Ergibt jetzt mal nicht so viel Sinn, auf den ersten Blick.*

Zitat 156

Schülerin 3 meint die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit würde keinen Sinn ergeben und findet sie nicht nachvollziehbar:

- 1 *S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Das heißt nicht zusammengerechnet, einfach nur ...*
 2 *B: In dem Fall nicht zusammengerechnet.*
 3 *S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Das macht ja keinen Sinn, also man sieht's ja nicht so,*
 4 *man sieht's ja viel ... schneller ...*
 5 *B: Mhm. Also, findest du das irgendwie nachvollziehbar, oder völlig ...*
 6 *S3: Nein. (lacht)*
 7 *B: Ist einfach nur seltsam?*
 8 *S3: Jaa. (lacht)*

Zitat 157

Schüler 4 findet die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit komisch und meint, sie ergäbe keinen Sinn:

- 1 *S4: Komisch. (lacht)*
 2 *B: Komisch, oder? Ja?*
 3 *S4: Ja. ... ergibt wenig Sinn.*

Zitat 158

Schüler 5 bemerkt, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit klinge für ihn unlogisch und zeigt mit einem Beispiel bei alltäglichen Geschwindigkeit, dass sie nicht intuitiv ist:

- 1 *S5: Hmm ... es klingt irgendwie unlogisch für mich, weil ... wenn ich mich jetzt keine*
 2 *Ahnung sagen wir 10 km/h bewege und neben mir bewegt sich jemand mit 20 dann wirkt*
 3 *es ja für mich nicht wie 20, sondern nur wie 10.*
 4 *B: Mhm.*
 5 *S5: Deswegen ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... passt das für mich nicht ganz zusammen.*

Zitat 159

Schülerin 6 meint, dass es nichts Schnelleres als Licht gäbe und führt die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auf ein Messproblem zurück:

1 *S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja ... (lacht) das is vielleicht weil sich das Licht halt*
2 *mit der Geschwindigkeit ausbreitet und ich glaub es gibt ja nichts Schnelleres(.*?) Oder*
3 *das dann ... dass man nicht mehr messen kann. (lacht)*

Zitat 160

Nach einer Rückfrage behauptet sie, dass man die Geschwindigkeit des Lichtes so nicht messen könne:

1 *S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... weiß nicht*
2 *vielleicht ... die messen ja auch durch das Licht sozusagen, also man kann Licht, man*
3 *kann hier so nichts messen, weil's ja irgendwie ... weil das Licht is, also kann man nicht*
4 *...*

Zitat 161

Schülerin 6 kann sich die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit also nur durch Probleme mit der Messung erklären. Auf die Frage, ob sie die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit komisch finde, antwortet sie:

1 *S6: Ja. (lacht)*

Zitat 162

Schülerin 7 findet die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht überraschend und gibt verschiedene Erklärungsansätze:

1 *S7: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja das überrascht mich jetzt nicht, eigentlich.*
2 *B: Wieso nicht?*
3 *S7: Ja weil ... Licht sich geradlinig ausbreitet ...*
4 *B: Ok.*
5 *S7: Ja, Welle-Teilchen-Dualismus egal, aber ...*
6 *B: (lacht)*
7 *S7: ... ähm ... du kannst ja jetzt nicht Licht ... langsamer abstrahlen, ... oder langsamer*
8 *messen als, als es ist, weil Licht bleibt immer gleich.*

Zitat 163

Es entsteht der Eindruck, dass sie alle Fakten, die ihr zum Thema Licht einfallen, nennt und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit annimmt, ohne tiefgehend darüber nachzudenken.

Schülerin 8 reagiert zunächst amüsiert auf die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

1 *S8: ... Ja ... ist ok für mich. (lacht)*

Zitat 164

Auf die Nachfrage, ob sie dieses Ergebnis ungewöhnlich, oder seltsam finde, entgegnet sie:

1 *S8: Ich mein ich habe ja auch begonnen zu addieren, ... plötzlich. Also es wäre irgendwie*
2 *als würde man davon ausgehen, dass es ... schneller wird, wenn man sich selbst auch*
3 *mitbewegt.*
4 *B: Ja.*
5 *S8: Und, dass es nicht so ist, ist erstaunlich, aber ... nehme ich halt jetzt mal so hin. (lacht)*

Schülerin 8 bemerkt also den Bruch zur klassischen Geschwindigkeitsaddition und zeigt auch, dass sie diese intuitiv findet. Sie zeigt aber auch die Bereitschaft die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in ihr Weltbild zu integrieren.

Schüler 9 findet die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit komisch und macht sich Gedanken über den Messprozess:

- 1 *S9: Ist komisch ... äh ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... das Licht bewegt sich immer*
 2 *gleich schnell, egal ... wie schnell wir uns bewegen ... Ich mein ... mit wie viel hat*
 3 *man's gemessen, hat man das gemessen mit äh ... ich mein wir können keine 100.000*
 4 *Kilome-, äh m/s fliegen, das schaffen wir nicht.*

Zitat 166

Er fragt sich, ob es bei großen Geschwindigkeiten doch zu Auswirkungen kommen könnte:

- 1 *S9: Also kann es nicht sein, dass in ... irgendwelchen arbiträren Größen, Richtung Unend-*
 2 *lichkeit das halt erst auswirkt?*

Zitat 167

Nach Klarstellung, dass so etwas ausgeschlossen ist³¹ erklärt er, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit seltsam ist und keinen Sinn ergibt:

- 1 *S9: Hm, hmhm, dass die Lichtgeschwindigkeit immer gleich ist ... auch wenn ich relativ dazu*
 2 *bewege ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ...*
 3 *B Auf jeden Fall ist es mal seltsam, oder?*
 4 *S9: Es ist definitiv seltsam und macht keinen Sinn, ähm ... ich überlege jetzt ... (8 Sekunden*
 5 *Pause; Anm.) ... keine Ahnung, da bräuchte ich Zeit zum drüber nachdenken.*

Zitat 168

Schülerin 10 meint, dass sie die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht überrascht und findet sie logisch:

- 1 *S10: ... Also, ich glaube, das ist schon ... logisch, wenn man nachdenkt, weil ... ähm ...*
 2 *Licht bewegt sich dann ... anscheinend immer gleich ... und ... also gleich schnell*
 3 *und ähm ... dann ist es egal in welche Richtung das geht, oder wo es sich befindet, es*
 4 *verbreitet sich, oder bewegt sich gleich schnell.*
 5 *B: Also würdest du sagen ... das ... überrascht dich persönlich nicht so sehr, dass das Licht*
 6 *sich ... anders verhält als der Passagier den wir vorher betrachtet haben.*
 7 *S10: Hm, nein.*

Zitat 169

Weshalb die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für sie nicht überraschend ist, obwohl sie den Ergebnissen der von ihr korrekt angewendeten klassischen Geschwindigkeitsaddition widerspricht, ist unklar.

Schüler 11 sieht darin, dass nicht bekannt ist, welches der Raumschiffe sich bewegt, die Ursache für die gemessene Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

³¹Unter anderem, da die Lichtgeschwindigkeit von massebehafteten Körpern nicht überschritten werden kann und deshalb keine beliebig hohen Relativgeschwindigkeiten auftreten können.

1 *S11: Ok, ähm ... das heißt, es bewegt sich ein, ein Raumschiff bewegt sich und es wird immer*
 2 *300.000 anzeigen.*
 3 *B: Für das Licht ... ja.*
 4 *S11: ... Naja, ich sage wir wissen ja nicht welches Raumschiff sich bewegt und sie sind ja in*
 5 *Relation ... das heißt, wahrscheinlich ist da einfach diese Relation so, dass sie halt im*
 6 *Prinzip parallel stehen, infolge der Relation.*

Zitat 170

Die Aussage zeigt erneut die Vorstellung einer absoluten Bewegung, und dass das Relativitätsprinzip nicht tief verankert ist, da er davon spricht, dass wir nicht wissen, welches Raumschiff sich bewegt, und nicht bemerkt, dass das keine Rolle spielt, da Bewegung und Ruhe lediglich vom gewählten Inertialsystem abhängen. Schließlich meint er, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sei logisch, es gelingt ihm jedoch nicht, dies zu begründen:

1 *S11: Hm ... warum ist das so? (lacht) Ähm, ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ach so,*
 2 *ist ja logisch eigentlich, weil es ist ja eigentlich immer ... das Licht bewegt sich immer*
 3 *300.000 km, ob ich jetzt entgegensteuere, oder nicht ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ...*
 4 *minus v ...*

Zitat 171

Nach einer Nachfrage, ob also jeder Beobachter den Wert 300.000 km/s für das Licht messen würde und einer folgenden Bestätigung erkennt Schüler 11 jedoch einen Bruch mit der klassischen Physik:

1 *S11: Ok, weil, nein weil in der klassischen Physik gehen wir ja eigentlich davon aus, dass es*
 2 *ja einfach minus v gibt ... und dann ... wirkt das dagegen.*
 3 *B: Mhm.*
 4 *S11: Und das gilt halt jetzt für Licht nicht ... wahrscheinlich ... wird das irgendeine Teil-*
 5 *cheneigenschaft, wieder eine spezielle Eigenschaft von Licht sein? ... Ähem, nehme ich*
 6 *an(?.?)*

Zitat 172

Erneut bringt er dabei sein Wissen über Quantenphysik ins Spiel, obwohl dieses für die Relativitätstheorie zunächst unerheblich ist. Er bezeichnet die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als eine spezielle Eigenschaft des Lichts und nennt sie schließlich sogar eine Anomalie des Lichts:

1 *S11: Also ... ja. Ja, das ist diese ganze ... äh, Molekularebene und so, äh, nein es ist nicht*
 2 *die Molekularebene, ich bin wahnsinnig schlecht mit den Fachbegriffen, fragen sie nicht*
 3 *den Herr Professor XY, aber (lacht) ähm, nein ... das wird wahrscheinliche irgendeine*
 4 *eigene Anomalie des Lichts sein, würde ich sagen, aber ... für uns ... schwer vorstellbar.*

Zitat 173

Schüler 11 findet die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit schwer vorstellbar und erkennt noch nicht, dass sie mit der Beschaffenheit der Raumzeit zu tun hat.

Schülerin 12 findet die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit logisch, weil Licht viele ungewöhnliche Eigenschaften habe, konstatiert jedoch, dass sie nicht selbst darauf gekommen wäre:

der klassischen Geschwindigkeitsaddition richtigen Betrag der Geschwindigkeit, erhalten jedoch das falsche Vorzeichen. Drei Schüler können die letzte Aufgabe nicht im Sinne der klassischen Physik richtig lösen. Insgesamt ist das Verständnis von 10 der 13 Schüler für die klassische Geschwindigkeitsaddition also brauchbar für den Anschluss im Rahmen der Relativitätstheorie. Insbesondere erwartet keiner der Befragten eine für alle Beobachter gleiche Lichtgeschwindigkeit. Die Betrachtung einer Situation, in der das Licht sich relativ zur Lichtquelle in die gleiche Richtung bewegt wie das Raumschiff, aus dem heraus die Lichtgeschwindigkeit gemessen wird, stellt 4 der 13 Schüler vor größere Probleme, bei einer Schülerin reicht ein Hinweis, damit sie zum korrekten Ergebnis im Sinne der klassischen Physik gelangt. Auf diesen Fall sollte also bei der Behandlung der klassischen Geschwindigkeitsaddition geachtet werden. Zwei der Schüler zeigen die Vorstellung einer absoluten Bewegung, drei der Schüler haben Schwierigkeiten damit, den Begriff der Relativgeschwindigkeit zu erfassen. Zwei Schüler denken, vermutlich beeinflusst vom Unterricht zur Quantenphysik, über die Natur des Lichts nach, einer erwartet deshalb sogar, dass die Lösung nicht dem Ergebnis der klassischen Geschwindigkeitsaddition entspricht.

Neun der 13 Schüler sind von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht. Von den vier nicht überraschten Schülern scheint nur einer den Bruch zur klassischen Physik zu erkennen. Insbesondere sind drei Schüler nicht überrascht, obwohl sie zuvor die Aufgaben zur klassischen Geschwindigkeitsaddition korrekt gelöst haben. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit scheint also zumindest bei vorheriger Behandlung der intuitiven, klassischen Geschwindigkeitsaddition für die Schüler überraschend zu sein. Über den Fall, dass zuvor nicht über die klassische Geschwindigkeitsaddition gesprochen wird, kann keine Aussage getroffen werden. Fünf Schüler zeigen große Bereitschaft, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in ihr Weltbild zu integrieren, drei Schüler versuchen, eine Erklärung zu finden, keiner behauptet explizit, dass das Ergebnis falsch sein müsse. Ein Schüler zeigt tief verankerte Vorstellungen von absoluter Bewegung, und dass das Relativitätsprinzip bei ihm nicht tief verankert ist.

6.3. Gleichzeitigkeit

Für das Gespräch zur Gleichzeitigkeit dienten die folgenden Fragen als Leitfaden.

Frage 1: Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B mit $v = 100000 \text{ km/s}$. Auf beiden Raumschiffen befinden sich Messgeräte, die exakt messen können, ob zwei Ereignisse gleichzeitig geschehen. In Raumschiff B werden zwei Fernseher F1 und F2 eingeschaltet (Abb. 6.6). Das Gerät in B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet wurden. Was misst das Gerät in Raumschiff A? Begründe deine Antwort!

Frage 2: Kann es sein, dass das Gerät in Raumschiff A misst, dass die Fernseher nicht gleichzeitig eingeschaltet werden? Welcher würde dann zuerst eingeschaltet? Wäre das seltsam? Begründe deine Antwort!

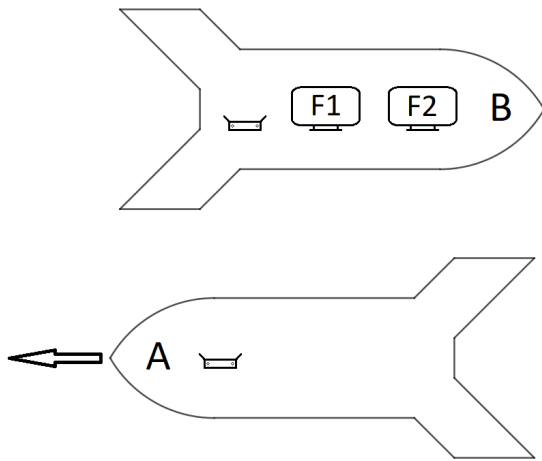


Abb. 6.6: Zu Frage 1. Messgeräte auf beiden Raumschiffen messen, ob die Fernseher F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden.

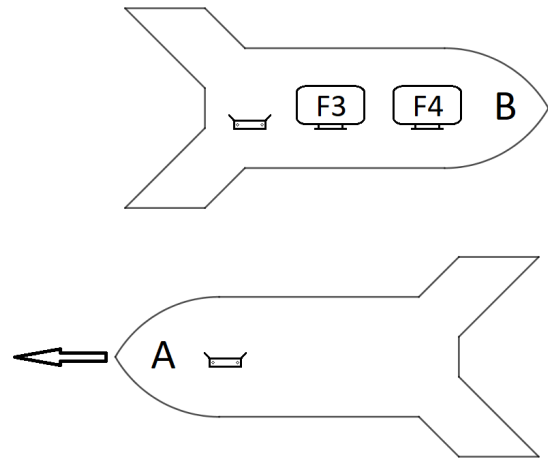


Abb. 6.7: Zu Frage 3. Messgeräte auf beiden Raumschiffen messen, ob die Fernseher F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden.

Frage 3: Es werden zwei Fernseher F3 und F4 in Raumschiff B eingeschaltet (Abb. 6.7). Das Gerät auf Raumschiff A misst, dass beide gleichzeitig eingeschaltet wurden. Was misst das Gerät in Raumschiff B? Begründe deine Antwort!

Frage 4: Kann es sein, dass das Gerät in Raumschiff B misst, dass die Fernseher nicht gleichzeitig eingeschaltet werden? Welcher würde dann zuerst eingeschaltet? Wäre das seltsam? Begründe deine Antwort!

Frage 5: Tatsächlich ergibt sich, dass Ereignisse, die aus Sicht von Raumschiff A gleichzeitig stattfinden, in Raumschiff B nicht gleichzeitig stattfinden und umgekehrt. Was sagst du zu dieser Tatsache?

Die Fragen 1, 2, 3 und 4 sollten das Verständnis der Schüler von Gleichzeitigkeit testen. Dabei zielten die Fragen 2 und 4 insbesondere darauf ab, Missverständnisse aufgrund der Lichtlaufzeit zu eliminieren, und zu untersuchen, worauf die Schüler etwaige Unterschiede in den Messergebnissen zurückführen. Damit sollte auch festgestellt werden, ob sie die Gleichzeitigkeit als etwas von der Messung Unabhängiges, oder durch die Messung Definiertes ansehen. Nach der speziellen Relativitätstheorie wird das Gerät in Raumschiff A in den ersten beiden Fragen messen, dass F1 vor F2 eingeschaltet wird. Dies könnte bei der gegebenen Abbildung dazu verleiten, fälschlicherweise die Lichtlaufzeiten als Ursache zu sehen. Bei Frage 3 und 4 ist dies jedoch ausgeschlossen, da das Gerät in Raumschiff B misst, dass F4 vor F3 eingeschaltet wird³².

Mit Frage 5 sollte die Bereitschaft der Schüler, die Relativität der Gleichzeitigkeit anzunehmen, getestet werden.

³²Für eine ausführliche Behandlung siehe Abschnitt 3.3.2.

6.3.1. Auswertung der Interviews zur Gleichzeitigkeit

6.3.1.1 Berücksichtigung der Lichtlaufzeit

In fünf der Interviews ergaben sich Gespräche zur Auswirkung der Lichtlaufzeit.

Schüler 2 berücksichtigt in seinen Betrachtungen die Signallaufzeit und kommt zu dem Schluss, dass das Gerät auf Raumschiff A misst, dass F1 früher eingeschaltet wird:

- 1 *S2: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... (räuspert sich) Weil es sich nach Richtung links bewegt*
2 *würde ich mal vom logischen Verständnis sagen, das es misst, dass zuerst F1 eingeschaltet*
3 *wird, nach dem, was Sie vorhin aber schon zur Relativitätstheorie erklärt haben vermute*
4 *ich aber, dass es trotzdem beide, misst dass beide gleichzeitig eingeschaltet werden.*

Zitat 176

Er begründet das damit, dass das Licht von F1 schneller zum Messgerät auf Raumschiff A gelangt, da sich F1 näher an diesem befindet:

- 1 *S2: Weil sich ... weil sich A ja von mir aus nach links bewegt und F1 links ist von F2.*
2 *B: Mhm.*
3 *S2: Deshalb ist er (F1; Anm.) ja näher zum Messgerät...*

Zitat 177

Er akzeptiert die Möglichkeit, dass das Gerät diesen Effekt berücksichtigt, bringt jedoch bei der zweiten Situation zur Gleichzeitigkeit erneut Signallaufzeiteffekte ins Spiel:

- 1 *S2: ... (15 Sekunden Pause; Anm.) ... (räuspert sich) Ich würde sagen, dass F4 früher ein-*
2 *geschaltet wird.*
3 *B: Wie kommst du zu dieser Überzeugung?*
4 *S2: Weil es be-, A bewegt sich eben von mir aus Richtung links ...*
5 *B: Mhm.*
6 *S2: ... also würde es – bekommt es die Signale von F3 früher, also muss eben F4 früher*
7 *eingeschaltet sein, damit die Signale gleichzeitig ankommen.*

Zitat 178

Er argumentiert, dass F4 früher eingeschaltet worden sein muss, da F4 weiter vom Messgerät auf Raumschiff A entfernt ist und die Signale gleichzeitig bei diesem Gerät ankommen. Nach einem erneuten Hinweis, dass die Messgeräte die Daten sammeln und anschließend auswerten, akzeptiert Schüler 2, dass die Signallaufzeit für das Messergebnis keine Rolle spielt.

Schüler 4 erwartet einen kleinen Zeitunterschied beim Messgerät in Raumschiff A, da F2 weiter vom Gerät entfernt ist und das Signal somit länger braucht, um es zu erreichen:

- 1 *S4: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... also ... bis die Messung beim ... Messgerät an-*
2 *kommt von F2 dauert's halt bisschen länger, weil der weiter entfernt is ... und ... weil*
3 *sich Raumschiff A auch wegbewegt ist da wahrscheinlich dann ... ein kleiner Zeitunter-*
4 *schied(.?)*

Zitat 179

Nachdem der Messprozess als Sammlung von Daten durch das Messgerät und anschließende Auswertung beschrieben wird, sodass Signallaufzeiten berücksichtigt werden, berücksichtigt Schüler 4 die Lichtlaufzeit nicht mehr.

Schüler 9 fragt nach der Berücksichtigung von Signallaufzeiten, bevor er seine Antwort auf die Frage nach dem Messergebnis in Raumschiff A gibt:

- 1 *S9: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... (unverständlich, flüstern) ... hat das, ... gibt's einen*
2 *Toleranzbereich von wegen äh ... je weiter der Fernseher weg ist, desto ...*
3 *B: Wird miteinberechnet.*
4 *S9: Wird miteinberechnet.*

Zitat 180

Er akzeptiert, dass durch eine Messung über einen Zeitraum hinweg mit anschließender Datenauswertung die Signallaufzeit berücksichtigt werden kann, und erwähnt keine Laufzeiteffekte mehr.

Schülerin 10 meint bei der Frage danach, ob es eine Möglichkeit gäbe, dass die Messgeräte auf den beiden Raumschiffen zu verschiedenen Ergebnissen gelangen, dass es daran liegen könnte, dass F3 sich näher am Messgerät befindet als F4:

- 1 *S10: Hm ... wenn ... ähm ... wahrscheinlich irgendwas nicht ... genau eingestellt ist, oder*
2 *wenn diese Geschwindigkeit zwischen A und B auch eine Rolle dabei spielt. Ähm, dass*
3 *... zum Beispiel A bisschen später mitbekommt als B, weil B befindet sich ja neben F3*
4 *und F4 ... und ... wenn es A ein bisschen verzögert mitbekommt, dann ist es bei B ein*
5 *bisschen was anderes, aber halt wahrscheinlich ... richtiger(?.?)*
6 *B: Ok. Also du würdest sagen, wenn man das aber mit-, mitberücksichtigt, wenn das Messgerät*
7 *das auch mitberücksichtigt, dann müssen sie auch das Gleiche messen.*
8 *S10: Ja.*

Zitat 181

Sie akzeptiert problemlos, dass das Messgerät diesen Effekt mitberücksichtigen kann.

Schüler 11 argumentiert zunächst, dass sich das Licht von beiden Fernsehern weg mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreitet und es deshalb zu keinem Unterschied kommt, den er jedoch in der klassischen Physik erwarten würde:

- 1 *S11: Hm ... was misst das Gerät auf Raumschiff A ... hm. Also wir wissen, ... wir wissen,*
2 *dass das Licht, egal wie es geht, immer 300.000 sein wird, das heißt ... im Prinzip, ähm,*
3 *die, äh, haben ... wenn da ein-, eine Lampe wäre und da eine Lampe, würde es beides*
4 *300.000 messen. Das heißt hier (F1; Anm.) geht der Fernseher an und hier (F2; Anm.)*
5 *geht auch der Fernseher an, dann sollte es, dann sollte es theoretisch ja ... ähm, auch*
6 *gleichzeitig messen, dass es gleichzeitig angeht. Ich meine, ich glaube in der klassischen*
7 *Physik wäre es so, dass es ... halt verschoben ist und deswegen hast du halt die km/h*
8 *noch eingerechnet in die Differenz da, aber halt ... wenn wir das da annehmen, dann ist*
9 *es, glaube ich, auch gleichzeitig.*

Zitat 182

Darauf angesprochen, dass sich einer der Fernseher weiter weg vom Messgerät in Raumschiff A befindet als der andere meint er:

- 1 *S11: Jaja, ... aber ... das war ja bei der Lichtgeschwindigkeit auch egal, oder, wo wir sind(.?)*
2 *Und jetzt habe ich mir gedacht ... bei der klassischen Physik hätte ich jetzt auch gesagt*
3 *... da müsste diese Differenz sein, aber da wir eh beim Licht ... egal in welche Richtung*
4 *wir fahren, keine Ahnung ...*

Zitat 183

Er nimmt also an, dass eine gleiche Laufzeit, unabhängig vom Abstand der Lichtquelle, auch ein gleichzeitiges Ankommen beim Messgerät in Raumschiff A impliziert. Diese Annahme ist falsch und seine Argumentation für den seiner Meinung nach auftretenden Unterschied zur klassischen Physik nicht schlüssig, da sich nach der klassischen Geschwindigkeitsaddition die Relativgeschwindigkeit der Lichtsignale von den Fernsehern zum Messgerät in Raumschiff A um den gleichen Betrag ändern würden. Schüler 11 ist offenbar nicht klar, welche Auswirkung die Lichtlaufzeit tatsächlich hat, und auf welche Art sie berücksichtigt werden müsste. Nachdem er erfährt, dass das Gerät in Raumschiff A misst, dass die beiden Fernseher sicher nicht gleichzeitig eingeschaltet wurden, bringt er jedoch den Abstand der Fernseher ins Spiel:

- 1 *S11: Sicher nicht gleichzeitig gemessen, ah ... ja es ist, es ist halt ... die Frage ist was*
2 *messen wir eigentlich.*
3 *B: Ob sie gleichzeitig ... eingeschaltet werden.*
4 *S11: Aber, wie ...*
5 *B: Wie ist jetzt tatsächlich nicht ... relevant.*
6 *S11: Ok, wie ist nicht relevant.*
7 *B: Ja.*
8 *S11: Ok, weil das habe ich jetzt, wäre mein erster Tipp, ähm ... ok, wie ist nicht relevant*
9 *... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... hier, also ... bei B, das hier zeigt, gleichzeitig an*
10 *und die werden gleichzeitig eingeschalten, das hier zeigt nicht gleichzeitig an ... warum*
11 *ist das so ... ? Wie ist nicht relevant ... wenn wie nicht relevant ist, dann ist eigentlich*
12 *der Abstand ja ... einfach irrelevant. Hm, ... so, andere ... (5 Sekunden Pause; Anm.)*
13 *... ok, also wenn wir, wenn es irrelevant ist wie es gemessen wird, ist der Abstand egal,*
14 *das heißt das können wir in Klammer setzen, aber dann haben wir ... was, was können*
15 *wir noch ... (lacht) ... ähm ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ich muss, ich muss kurz*
16 *nachdenken, es ist ein bisschen ... (unverständlich)*

Zitat 184

Nachdem mit ihm besprochen wurde, dass der Messprozess selbst für dieses Ergebnis keine Rolle spielt, spricht er davon, dass er deshalb den Abstand der Fernseher vom Messgerät ignorieren kann. Dies ist interessant, da er den Abstand offenbar bereits vorher nicht in seine Überlegungen miteinbezogen hat. Mit Schüler 11 müsste offenbar zuerst anhand von konkreten Beispielen über den Effekt der Lichtlaufzeit gesprochen werden, bevor deren Eliminierung im Messprozess erläutert werden kann. Insgesamt scheint Schüler 11 nicht direkt die Laufzeit in seine Überlegungen miteinzubeziehen, sondern nur die Signalgeschwindigkeit.

Schülerin 12 berücksichtigt zunächst keine Laufzeiteffekte, erkennt jedoch bei Frage 3 deren Relevanz:

1 *S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ah, vielleicht dadurch, dass sie sich, ähm ..., dass*
 2 *sich Raumschiff A auf Raumschiff B ... zubewegt, dass es vielleicht denken könnte, dass*
 3 *... die beiden Fernseher gleichzeitig eingeschaltet werden obwohl vielleicht ... ähm ...*
 4 *F3 später eingeschaltet wurde als F4, weil F4 vor F3 steht?*
 5 *B: Ok. Woran könnte das liegen?*
 6 *S12: Dadurch, dass ... es halt zuerst bei F4 vorbeikommt, als bei F3.*

Zitat 185

Sie argumentiert zunächst genau wie Schüler 2 und Schülerin 10, dass F4 früher eingeschaltet worden sein muss als F3, weil sein Signal länger braucht um zum Messgerät auf Raumschiff A zu gelangen, da er weiter von diesem entfernt ist. Ihre Äußerung, dass das Messgerät auf Raumschiff A zuerst bei F4 vorbeikommt, muss demnach so gemeint sein, dass deshalb zum auf dem Bild dargestellten Zeitpunkt F4 schon weiter vom Gerät entfernt ist, da diese Feststellung andernfalls der vorherigen Aussage widersprechen würde³³. Sie akzeptiert problemlos, dass das Messgerät diesen Effekt berücksichtigen kann, indem es zunächst alle Daten sammelt und diese anschließend auswertet.

6.3.1.2 Schülervorstellungen zur Gleichzeitigkeit

Alle 13 befragten Schüler sehen Gleichzeitigkeit als etwas Absolutes an.

Schülerin 1 ist überzeugt, dass das Gerät auf Raumschiff A ebenfalls misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 *S1: Ja, dann auch, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.*

Zitat 186

Sie meint ein anderes Ergebnis könne nur durch einen Messfehler zustande kommen:

1 *S1: Ja wenn ein Fehler drin ist (lacht) ... im System.*

Zitat 187

Auf die Frage, ob es auch eine Möglichkeit gäbe, dass das Gerät in Raumschiff A misst, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, wenn eine perfekte Messung vorliegt antwortet sie:

1 *S1: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Mmm ja ne dann nicht.*

Zitat 188

Auch im umgekehrten Fall, dass das Gerät auf Raumschiff A feststellt, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden ist sie überzeugt, dass das Gerät auf Raumschiff B das gleiche Ergebnis erhält:

1 *S1: Ja auch, dass sie gleichzeitig sind, wenn kein Fehler im System ist.*

Zitat 189

³³Kommt das Gerät zuerst bei F4 vorbei, so ist es bis zu dem Zeitpunkt, an dem es F4 erreicht näher an F4 als an F3, sodass ein gleichzeitiges Ankommen der Signale bedeuten würde, dass der weiter entfernte Fernseher F3 zuerst eingeschaltet worden wäre.

Wiederum meint sie, dass nur ein Fehler für ein anderes Ergebnis verantwortlich sein könne. Schülerin 1 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff.

Schüler 2 berücksichtigt die Lichtlaufzeit, erwartet jedoch aufgrund des bisherigen Gesprächs einen überraschenden Effekt:

- 1 *S2: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... (räuspert sich) Weil es sich nach Richtung links bewegt*
2 *würde ich mal vom logischen Verständnis sagen, dass es misst, dass zuerst F1 eingeschalt-*
3 *tet wird, nachdem was Sie vorhin aber schon zur Relativitätstheorie erklärt haben vermute*
4 *ich aber, dass es trotzdem beide, misst, dass beide gleichzeitig eingeschaltet werden.*

Zitat 190

Nach einem Gespräch über die Berücksichtigung der Laufzeiteffekte ist er jedoch davon überzeugt, dass auch das Gerät auf Raumschiff A misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S2: Ja dann würde es messen das beide gleichzeitig eingeschaltet sind.*

Zitat 191

Beim zweiten Beispiel zur Gleichzeitigkeit argumentiert Schüler 2 erneut mit Effekten der Lichtlaufzeit. Nach einem Gespräch darüber, dass der Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung verstanden wird, ist er jedoch überzeugt, dass auch das Gerät auf Raumschiff B misst, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S2: Ja dann würden, würd ... das Messgerät in B auch, auch messen, dass sie gleichzeitig*
2 *eingeschaltet werden.*

Zitat 192

Schüler 2 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff.

Schülerin 3 ist der Ansicht, dass auch das Gerät auf Raumschiff A misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden und sieht keine Möglichkeit für das Zustandekommen eines anderen Ergebnisses:

- 1 *S3: Dass ... auch gleich eingeschalten werden, also gleichzeitig(.?)*
2 *B: Mhm. Und würdest du sagen es gibt irgendeine Möglichkeit, dass dieses Gerät etwas An-*
3 *deres messen würde?*
4 *S3: Ich glaub eigentlich nicht, weil wenn es, wenn es ... so wie vorher ist, dass die Geschwin-*
5 *digkeit einfach gleichbleibt, dann glaub ich, dass das auch ... einfach anzeigt, dass sie*
6 *gleichzeitig eingeschalten werden.*

Zitat 193

In der zweiten besprochenen Situation ist sie ebenso überzeugt, dass das Gerät auf Raumschiff B misst, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden, und kann sich als Ursache für ein anderes Ergebnis nur eine ungenaue Anzeige vorstellen:

- 1 *S3: Dass sie gleichzeitig eingeschalten wurden.*
2 *B: Und würdest du auch hier sagen es gibt irgendeine Möglichkeit, dass da was anderes*
3 *rauskommt?*

- 1 *S5: Ja dann, ähm, auch, dass sie gleichzeitig eingeschalt-, also wieder dasselbe.*
2 *B: Und würdest du sagen, da gibt's irgendeine Möglichkeit, dass es was anderes anzeigt?*
3 *S5: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... nein, eigentlich nicht.*

Zitat 199

Schüler 5 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und kann sich nicht vorstellen, dass die Messgeräte zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen. Er nimmt offenbar gut an, dass es sich um exakte Messungen handelt.

Schülerin 6 meint zunächst, dass das Gerät auf Raumschiff A ebenfalls misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S6: Auch das gleiche, das es gleichzeitig is.*

Zitat 200

Bei ihrer Antwort auf die Frage, ob sie sich vorstellen könne, dass das Gerät auf Raumschiff A ein anderes Ergebnis erhält wird jedoch deutlich, dass sie fälschlicherweise annimmt, dass die beiden Messgeräte miteinander verbunden sind:

- 1 *S6: Wenn die beiden (Messgeräte; Anm.) sozusagen gekoppelt sind und das sagt gleichzeitig,*
2 *dann das ... das ja auch.*

Zitat 201

Nach einer Klarstellung, dass die Messgeräte unabhängig voneinander arbeiten, ist sie aber immer noch der Ansicht, dass beide Geräte das gleiche Resultat erhalten:

- 1 *S6: Doch ich glaub schon auch gleichzeitig.*

Zitat 202

Auf die Frage, ob sie sich keine Möglichkeit vorstellen könne, dass die beiden Geräte zu verschiedenen Ergebnissen gelangen antwortet sie zustimmend:

- 1 *S6: Ja(.?) (lacht)*

Zitat 203

Beim zweiten Beispiel meint sie ebenfalls, dass das Gerät auf Raumschiff B misst, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S6: Ich hätte auch wieder gesagt gleichzeitig.*

Zitat 204

Schülerin 6 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und nimmt die Tatsache, dass es sich um exakte Messungen handelt, gut an.

Schülerin 7 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A ebenfalls misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden. Als mögliche Ursache für andere Resultate nennt sie Störungen, also Messfehler, die sie jedoch korrekterweise außer Acht lässt:

1 *S7: ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, wahrscheinlich misst das das auch, dass es*
 2 *gleichzeitig passiert.*
 3 *B: Ok. Würdest du sagen es gibt ... überhaupt irgendeine Möglichkeit, dass es was anderes*
 4 *misst?*
 5 *S7: ... Frequenzen, so Störungen und so ... könnten schon passieren, aber ... (3 Sekunden*
 6 *Pause; Anm.) ... ich lass das jetzt mal außer Acht und sage sie gehen gleichzeitig.*

Zitat 205

Im zweiten Beispiel ist sie überzeugt, dass das Gerät auf Raumschiff B ebenfalls misst, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 *S7: Dass sie gleichzeitig eingeschalten werden, also dass es gleichzeitig passiert.*

Zitat 206

Schülerin 7 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und kann sich nur Messfehler als Ursache für verschiedene Resultate der beiden Messgeräte vorstellen. Sie akzeptiert die Tatsache, dass es sich um perfekte Messgeräte handelt, gut.

Schülerin 8 missversteht zunächst die Frage und erklärt, dass das gerät auf Raumschiff A ebenfalls feststellt, ob die beiden Fernseher gleichzeitig eingeschaltet werden. Nach einer erneuten Nachfrage, zu welchem Ergebnis das Gerät kommen würde, meint sie, dass es ebenfalls misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 *S8: Dann wird das das andere Messgerät (auf Raumschiff A; Anm.) auch sagen.*

Zitat 207

Sie sieht keine Möglichkeit für das Zustandekommen eines anderen Ergebnisses:

1 *S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... nein.*

Zitat 208

In der zweiten Situation ist sie überzeugt, dass das Gerät auf Raumschiff B ebenfalls misst, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 *S8: Es ... sie haben sich gleichzeitig eingeschaltet und ...*

Zitat 209

Dabei formuliert sie das Messergebnis in eine Tatsache über den Ablauf der Ereignisse um. Schülerin 8 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und akzeptiert die Tatsache, dass es sich um perfekte Messungen handelt, gut.

Schüler 9 ist nach einer Klärung dazu, dass berücksichtigt wird, dass einer der Fernseher weiter vom Messgerät entfernt ist, der Ansicht, dass das Gerät auf Raumschiff A zum gleichen Resultat gelangt wie das auf Raumschiff A:

1 *S9: Ok, dann misst, äh ... das Gerät A auch ... genau, dass sie gleichzeitig eingeschaltet*
 2 *werden.*

Zitat 210

Bei seiner Antwort auf die Frage, ob es eine Möglichkeit gäbe, dass die beiden Geräte zu verschiedenen Resultaten gelangen, bringt er erneut die Lichtlaufzeit als Ursache ins Spiel und meint, es könne sich nur um einen Messfehler handeln:

- 1 *S9: Also, wenn zum Beispiel diese Toleran-, äh dieser Toleranzbereich nicht wäre, dann ...*
2 *wird's logischerweise so, ... sind jetzt ganz ganz minimale Größen, aber weil der Weg*
3 *hier (zu F1; Anm.) kürzer als der Weg hier (zu F2; Anm.) und somit wird's ... das da*
4 *... äh, als zuerst eingeschaltet empfinden, weil das kann nicht ... gleichzeitig ... äh*
5 *beides messen, solange's nicht genau in der Mitte, oder genau gleich entfernt ist, aber ...*
6 *B: Und in Summe hätten wir quasi einen Messfehler?*
7 *S9: Genau! Einen kleinen Messfehler.*

Zitat 211

Schüler 9 meint, dass das Messgerät auf Raumschiff B ebenfalls misst, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden, da verzerrende Effekte berücksichtigt werden:

- 1 *S9: Ahm, dementsprechend ... wie haben wieder diesen Messfehler, der aber berücksichtigt*
2 *wurde, das heißt das Gerät auf Raumschiff B misst genau das auf Raumschiff A.*

Zitat 212

Schüler 9 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff.

Schülerin 10 fragt zunächst nach, was genau gemessen wird, und ob die Geräte unabhängig voneinander messen. Nach einer Erläuterung und Bestätigung bejaht sie die Frage danach, ob das Gerät auf Raumschiff A ebenfalls misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S10: ... Ähm, dass, ähm ... also diese Geräte messen, dass sie ... gleichzei-, dass, ... was*
2 *war das nochmal was diese Geräte messen?*
3 *B: Unabhängig voneinander messen sie jeweils, ob ... diese Fernseher hier gleichzeitig ein-*
4 *geschaltet werden, oder nicht.*
5 *S10: Ok, dann misst, also dann misst ... das da, also A genauso wenn F1 und F2 einge-*
6 *schaltet werden, unabhängig von diesem Messgerät (auf Raumschiff B; Anm.)?*
7 *B: Mhm, ach so, ja. Du würdest sagen, dass es auch misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet*
8 *werden?*
9 *S10: Ja.*

Zitat 213

Die Frage danach, ob sie sich ein anderes Ergebnis vorstellen könne, missversteht sie und versucht, eine andere Messung zu finden, die mit dem Gerät auf Raumschiff A durchgeführt werden kann. Bei der zweiten Aufgabe ist sie wieder der Ansicht, dass das Gerät auf Raumschiff B das gleiche Resultat erhält wie das auf Raumschiff A:

- 1 *S10: ... Ahm, wahrscheinlich schon, weil A das feststellt.*

Zitat 214

Als Ursache für ein anderes Ergebnis kann sie sich nur einen Messfehler vorstellen:

1 *S10: Hm ... wenn ... ähm ... wahrscheinlich irgendwas nicht ... genau eingestellt ist, oder*
 2 *wenn diese Geschwindigkeit zwischen A und B auch eine Rolle dabei spielt. Ähm, dass*
 3 *... zum Beispiel A bisschen später mitbekommt als B, weil B befindet sich ja neben F3*
 4 *und F4 ... und ... wenn es A ein bisschen verzögert mitbekommt, dann ist es bei B ein*
 5 *bisschen was anderes, aber halt wahrscheinlich ... richtiger(.?)*

Zitat 215

Schülerin 10 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und kann sich nur einen Messfehler als Grund für verschiedene Resultate vorstellen.

Schüler 11 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A ebenfalls misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden, da das Licht für jeden Beobachter gleich schnell ist, und lässt dabei die verschiedenen Abstände außer Acht:

1 *S11: Hm ... was misst das Gerät auf Raumschiff A ... hm. Also wir wissen, ... wir wissen,*
 2 *dass das Licht, egal wie es geht, immer 300.000 sein wird, das heißt ... im Prinzip, ähm,*
 3 *die, äh, haben ... wenn da ein-, eine Lampe wäre und da eine Lampe, würde es beides*
 4 *300.000 messen. Das heißt hier (F1; Anm.) geht der Fernseher an und hier (F2; Anm.)*
 5 *geht auch der Fernseher an, dann sollte es, dann sollte es theoretisch ja ... ähm, auch*
 6 *gleichzeitig messen, dass es gleichzeitig angeht. Ich meine, ich glaube in der klassischen*
 7 *Physik wäre es so, dass es ... halt verschoben ist und deswegen hast du halt die km/h*
 8 *noch eingerechnet in die Differenz da, aber halt ... wenn wir das da annehmen, dann ist*
 9 *es, glaube ich, auch gleichzeitig.*

Zitat 216

Offenbar geht es ihm in seiner Argumentation um Effekte der Lichtlaufzeit, die er nicht korrekt berücksichtigt, sodass er zum gleichen Resultat gelangt wie bei Nichtberücksichtigung dieser Effekte. Schüler 11 nimmt offenbar fälschlicherweise an, dass die, im Unterschied zur klassischen Physik, für jeden Beobachter gleiche Lichtgeschwindigkeit die Berücksichtigung von Laufzeiteffekten hinfällig macht. Die Frage danach, ob er eine Möglichkeit sehe, dass das Gerät auf Raumschiff A zu einem anderen Ergebnis gelangt, verneint er:

1 *S11: Als Gleichzeitigkeit. Naja, ... hm, ja wenn man sie halt nicht gleichzeitig anschal-, äh,*
 2 *ah, einschaltet.*
 3 *B: Also nur, wenn das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) auch misst, dass es nicht gleichzeitig*
 4 *ist(.?)*
 5 *S11: Jaja, ich glaube ... Ja, wenn sie in rela-, wenn diese wieder in dieser Relation stehen,*
 6 *... aber dann glaube ich ist das immer gleich. ... Wie beim Licht ... anscheinend.*

Zitat 217

Er formuliert das Messergebnis in eine Aussage über den zeitlichen Ablauf der Ereignisse um und sieht nur einen objektiv anderen Ablauf als mögliche Ursache für ein anderes Ergebnis an. Seine Begründung ist erneut die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Auch in der zweiten Situation meint Schüler 11, dass das die Geräte auf beiden Raumschiffen zum gleichen Resultat gelangen:

1 *S11: Naja, wenn meine Annahme vorher richtig war, dann (lacht) vielleicht, äh, dann muss*
 2 *es dasselbe messen.*

Zitat 218

Schülerin 12 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A ebenfalls misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

Sie sieht zunächst keine mögliche Ursache für ein anderes Resultat, kann sich also nicht vorstellen, dass das Gerät auf Raumschiff A zu einem anderen Ergebnis gelangt:

Bei der zweiten Situation fällt ihr jedoch die unterschiedliche Entfernung der Fernseher auf und bringt die Auswirkungen der Lichtlaufzeit ins Spiel. Nach einem Gespräch darüber, dass dieser Effekt vom Messgerät berücksichtigt wird, indem es die Daten über einen Zeitraum hinweg sammelt und anschließend auswertet, ist sie der Ansicht, dass beide Geräte das gleiche Messergebnis erhalten³⁴:

Schülerin 12 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und akzeptiert die Tatsache, dass die Messgeräte exakt messen.

1 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, wenn
2 die beiden (Fernseher; Anm.) gleichzeitig eingeschaltet werden und ... das (Gerät auf
3 Raumschiff A; Anm.) misst ...
4 B: Ob sie gleichzeitig eingeschaltet werden, oder nicht.
5 S13: Dann ... misst das wahrscheinlich auch, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden, wenn
6 das so passiert.

Sie zieht als mögliche Ursache für ein anderes Ergebnis zunächst eine nicht näher definierte Verzerrung der Zeit aufgrund der Bewegung von Raumschiff A mit Lichtgeschwindigkeit in Betracht³⁵:

³⁵Das Raumschiff bewegt sich allerdings „nur“ mit einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit.

Schüler 2 erklärt zunächst, dass es Sinn ergebe, weil die Fernseher sich unterschiedlich weit vom Messgerät entfernt befinden, meint jedoch nach einem erneuten Hinweis, dass dies berücksichtigt wird, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit komisch sei:

- 1 *S2: Ergibt jetzt mal irgendwie Sinn, weil die Fernseher nicht auf der gleichen Höhe sind, aber*
- 2 *... trotzdem spannend, weil ich dachte, dass die Geräte das berücksichtigen könnten ...*
- 3 *B: Das Gerät berücksichtigt die Signallaufzeit.*
- 4 *S2: Aber trotzdem wird es nicht gleichzeitig gemessen(.?)*
- 5 *B: Trotzdem wird es nicht gleichzeitig.*
- 6 *S2: Das ist jetzt wieder komisch.*

Zitat 227

Schülerin 3 meint, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit keinen Sinn ergebe und sie sie nicht verstehe:

- 1 *S3: Ja macht keinen Sinn schon wieder. (lacht)*
- 2 *B: (lacht)*
- 3 *S3: (flüstert)*
- 4 *B: Bitte?*
- 5 *S3: Das, das versteh ich nicht. (lacht)*

Zitat 228

Schüler 4 versucht eine Erklärung für die Relativität der Gleichzeitigkeit zu finden, die jedoch nicht wirklich verständlich ist:

- 1 *S4: Öh ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... hat wahrscheinlich irgendwas mit zeitlicher Abfolge*
- 2 *oder so zu tun, keine Ahnung.*
- 3 *B: Wie meinst du das?*
- 4 *S4: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... dadurch, dass ... sich das ... dazwischen vergeht ja*
- 5 *eine gewisse Zeit und vielleicht hat das dann irgendwie einen Effekt darauf?*
- 6 *B: Mhm.*
- 7 *S4: Und deswegen ... kommt dort irgendwas anderes raus?*

Zitat 229

Es ist unklar, zwischen welchen Ereignissen seiner Meinung nach Zeit vergeht. Sinnvoll wäre es, anzunehmen, dass es um die beiden Messungen geht, da die Geräte unterschiedliche Entfernungen von den Fernsehern haben. Welche Auswirkung diese Zwischenzeit hätte, ist nicht klar. Schüler 4 hat offenbar keine Probleme mit dem Konzept einer perfekten Messung.

Schüler 5 kann sich vorstellen, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit eine Tatsache ist, sie ist für ihn jedoch nicht intuitiv:

- 1 *S5: Hmm ... (17 Sekunden Pause; Anm.) ... also ich mein ich könnt's mir zwar vorstellen,*
- 2 *dass es stimmt ...*
- 3 *B: Mhm.*
- 4 *S5: ... aber ... wär jetzt nicht das woran ich denken würde, also, dass es unterschiedlich is.*

Zitat 230

Schülerin 6 versteht nicht, wie es zur Relativität der Gleichzeitigkeit kommt:

1 *S6: (lacht) Das versteh ich nicht warum. (lacht)*

Zitat 231

Schülerin 7 berücksichtigt bei Konfrontation mit der Relativität der Gleichzeitigkeit anders als zuvor die Signallaufzeit:

1 S7: Ah ... ja ... gut, wenn's ein Fernseher ist ... ähm ... ist ja kein Licht, oder geht's
2 darum wie sich dieses Fernsehlicht ausbreitet, oder wie man den Fernseher einschaltet?

Zitat 232

Nach einer Klarstellung, dass die Lichtlaufzeit berücksichtigt wird, denkt sie an ein Problem beim Einschaltvorgang:

1 S7: Ja, ok. Also jetzt meinen's mal kein Licht, also vielleicht, also ... der den Fernseher
2 einschaltet ist, also das, was den Fernseher einschaltet ist kein Licht, ist ja Strom.

Zitat 233

Dabei vernachlässigt sie, dass dies die Situation nicht auflösen würde, da dann z. B. in Frage 1 auch das Gerät auf Raumschiff B messen würde, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden. Schließlich gibt sie die Suche nach einer Erklärung auf und bestätigt, dass sie die Relativität der Gleichzeitigkeit nicht intuitiv findet:

1 S7: Ähm ... ja keine Ahnung ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... wird schon seinen Grund
2 haben. Aber es ...

3 *B: Aber es, ... du findest es jetzt nicht intuitiv, oder? Sofort nachvollziehbar ...*

4 *S7: Nein.*

Zitat 234

Schülerin 8 ist von der Relativität der Gleichzeitigkeit sehr überrascht und hat offenbar Probleme mit dem Begriff der Relativgeschwindigkeit:

1 S8: Wow. (*lacht*)

2 *B: Was sagst du dazu?*

3 S8: Ähm ... weiß ich jetzt nicht. (lacht) Ich mein man könnt's vielleicht, es, liegt's an der
4 Geschwindigkeit? Also hier (bei Raumschiff A; Anm.) ... es fehlt ja einfach nur der Pfeil
5 es bewegt sich ja immer noch so, oder?

Zitat 235

Nach einer Erinnerung daran, dass es egal ist welches der Raumschiffe sich bewegt, stellt sie fest, dass eine der Messungen fehlerhaft sein muss:

1 S8: ... Ja ... ist mir jetzt nicht ganz so ersichtlich, weil wenn es ist, dass beide ... es messen,
2 ob etwas gleichzeitig stattfindet, oder nicht, dann muss eines von beiden ja eigentlich
3 fehlerhaft sein wenn's gleichzeitig stattfindet, aber das andere das nicht ... feststellen
4 kann.

Zitat 236

Diese Aussage zeigt deutlich, dass sie zuvor nicht richtig erkannt hat, dass es aufgrund der Relativbewegung und den Grundprinzipien der Relativitätstheorie zur Relativität der Gleichzeitigkeit kommt, sondern, dass sie an einen Messfehler aufgrund der Relativbewegung denkt. Schülerin 8 trennt erneut das Messergebnis von einem gedachten objektiven zeitlichen Ablauf.

Schüler 9 meint zunächst, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit Sinn ergeben könnte, weil die Signallaufzeit das Ergebnis verzerren würde. Er macht einen Messfehler für die unterschiedlichen Ergebnisse verantwortlich:

- 1 *S9: ... Ja, das könnte Sinn er ... geben, vor allem weil eben ... Bewegung im Spiel ist ...*
2 *und die Bewegung das Messergebnis auf jeden Fall verzerren kann.*
3 *B: Ok.*
4 *S9: Ähm, also erst mal glaube ich es wird ungenauer dadurch, weil ... man hat ja trotzdem*
5 *ein Fenster in dem man, ähm ... das Signal empfangen muss. Und in dem Fenster kann*
6 *sich das Raumschiff halt trotzdem bewegen und ... und ... zeigt natürlich zeigt's, ähm*
7 *... einfach irgend-, also zeigt's an, dass F3 schneller ist, oder F4 schneller ist, oder*
8 *irgendwas, eines von beiden, oder ... also, ist eine Frage, F3, oder F4, ähm, welches von*
9 *beiden ist schneller eingeschaltet für dieses Gerät?*
10 *B: ... Ist ... irrelevant.*
11 *S9: Ja, ok. Ja, also ich glaube es liegt, äh, an der Bewegung und ... würde durchaus Sinn*
12 *machen.*
13 *B: Also du würdest sagen auch de facto wieder ein Messfehler, an sich.*
14 *S9: Ja! Ein Messfehler.*

Zitat 237

Schülerin 10 ist davon überrascht, dass aufgrund der Relativität der Gleichzeitigkeit die beiden Messgeräte bei exakter Messung sicher zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen:

- 1 *S10: Ja das ist ... also sicher nicht, hätte ich nicht gedacht, aber schon, also ich habe vor-*
2 *her auch irgendwie vermutet, dass, ... dass die, dass es irgendwas ... noch, ähm ...*
3 *dazukommt was diese Messungen verändert zwischen A und B, beziehungsweise, dass sie*
4 *nicht gleich rauskommen, aber ich hätte nicht gesagt, dass es ganz sicher nicht gleich ist.*
5 *B: Das Ergebnis war nämlich ... wenn die Messungen perfekt sind, auch dann würde es*
6 *messen, würde es ein ... nicht gleichzeitiges Ergebnis messen.*
7 *S10: Ok.*
8 *B: ... Findest du das überraschend, oder ... ?*
9 *S10: Na schon.*

Zitat 238

Ihre Bemerkung dazu, dass sie einen Unterschied schon vorher für möglich gehalten hatte deutet erneut auf eine Berücksichtigung der Signallaufzeit hin. Jedenfalls kann sie sich dadurch aber nicht erklären, dass es garantiert zu einem Unterschied kommt.

Schüler 11 fragt sich zunächst, was eigentlich gemessen wird, und macht sich Gedanken über den Messvorgang. Er versucht, eine Erklärung zu finden und bemerkt nach einer Klarstellung, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit unabhängig vom spezifischen Messprozess gilt, und dass er jetzt keine Erklärung finden müsse, dass er die Relativität der Gleichzeitigkeit verstehen möchte:

1 *S11: Ach so, nein, nein ich, ich mag, ich mag auch eine Erklärung finden. Äh, ist ja, ist ja*
2 *auch für mich ein bisschen nervig, dass ich das nicht kapiere. (lacht)*

Zitat 239

Schließlich stellt er fest, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit jedenfalls nicht intuitiv ist:

1 *S11: ... Mmh ... ja, also ich wäre selber nicht darauf gekommen, ich hätte es selber anders*
2 *erwartet. Aber das ist, glaube ich, bei vielen Sachen, vor allem bei Physik so, ich, ich*
3 *tue mir auch leicht mit Sachen verstehen ... aber ... manchmal ... manchmal, brauche*
4 *ich halt einfach die Hilfe um dahinterzukommen. Weil, ist halt dann einfach so ... um*
5 *die Ecke denken, geht ... manchmal, geht nicht immer.*

Zitat 240

Schülerin 12 versucht zunächst die Relativität der Gleichzeitigkeit mit den Signallaufzeiten zu berücksichtigen und meint, dass diese Sinn ergebe, bemerkt jedoch nach einem Hinweis dazu, dass die Abstände in der Messung berücksichtigt werden, dass sie in diesem Fall keine Ahnung habe wie es zur Relativität der Gleichzeitigkeit komme:

1 *S12: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... ich meine*
2 *es ergibt irgendwo Sinn, aber ich ... ich schätze jetzt mal, dass es was mit der Bewegung*
3 *zu tun hat.*
4 *B: Mhm. ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Inwiefern hat das was mit der Bewegung zu*
5 *tun?*
6 *S12: Hm ... naja, dass ... also ich hätte jetzt gesagt, dass es eben zuerst ... bei F4, als*
7 *bei F3 vorbeikommt, oder beziehungsweise auch was mit ... der Entfernung zu tun haben*
8 *könnte.*
9 *B: Und wenn man das in der Messung berücksichtigt aber trotzdem sich das ergibt, was*
10 *würdest du dann sagen?*
11 *S12: Ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... (lacht) ... ja da ... habe ich keine Ahnung.*
12 *(lacht)*

Zitat 241

Schülerin 13 meint, dass es aufgrund von Messfehlern bei hohen Geschwindigkeiten zur Relativität der Gleichzeitigkeit kommen könnte und bemerkt nach dem Hinweis, dass mögliche verzerrende Effekte berücksichtigt werden, dass dann die Fernseher eben nicht gleichzeitig eingeschaltet worden sein können:

1 *S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ok ... vielleicht, dass sich das so schnell bewegt,*
2 *also, dass sie sich relativ zueinander so schnell voneinander weg bewegen, dass es das gar*
3 *nicht so schnell gleichzeitig messen kann, oder, dass ... vielleicht die Ereignisabfolge*
4 *nicht gleichzeitig erfolgen kann weil es so schnell passiert?*
5 *B: Und, ah, das Gerät berücksichtigt das und wird aber trotzdem messen, dass die nicht*
6 *gleichzeitig eingeschaltet werden.*
7 *S13: ... (lacht) Dann sind sie nicht gleichzeitig eingeschaltet worden.*

Zitat 242

Sie nimmt in diesem Fall die Voraussetzung perfekter Messgeräte offenbar gut an, da sie von dem Messergebnis, dass die Fernseher nicht gleichzeitig eingeschaltet wurden sofort

darauf schließt, dass sie dann auch nicht gleichzeitig eingeschaltet wurden. Dabei wirkt es so, als wäre Schülerin 13 die Bedeutung der Relativität der Gleichzeitigkeit noch nicht vollumfänglich bewusst, da sie in ihrer Aussage nicht berücksichtigt, dass die beiden Messgeräte zu verschiedenen Aussagen gelangt sind. Somit erkennt sie nicht, dass sie vor dem Problem steht, dass die Fernseher im System eines Raumschiffs gleichzeitig eingeschaltet wurden und im anderen nicht. Das Relativitätsprinzip führt dann zur Relativität der Gleichzeitigkeit, da beide Systeme gleichberechtigt sind.

6.3.2. Zusammenfassung

Vier der 13 Schüler berücksichtigen in ihrer Argumentation die Lichtlaufzeit. In einem weiteren Gespräch kommt diese vor, wird jedoch vom Schüler nicht korrekt berücksichtigt. Alle diese Schüler akzeptieren, dass das Messgerät diese Effekte berücksichtigen kann, indem es die Daten zunächst über einen Zeitraum hinweg sammelt und anschließend auswertet. Auffällig ist, dass zwei der 8 weiblichen Personen und drei der 5 männlichen von selbst solche Effekte ansprechen. In den durchgeführten Interviews berücksichtigten also die männlichen Befragten deutlich häufiger Effekte der Lichtlaufzeit in ihren Argumentationen.

Alle 13 interviewten Schüler haben einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff. Sechs der Schüler können sich nur Messfehler als Ursachen für andere Ergebnisse vorstellen, was jedoch mit der Vorgabe idealer Messgeräte nicht kompatibel ist. Fünf Schüler akzeptieren, dass es sich um perfekte Messgeräte handelt, sehen dann aber keine Möglichkeit für das Zustandekommen anderer Ergebnisse. Eine Schülerin sieht zwar die Möglichkeit von Messfehlern als Ursache für Unterschiede, akzeptiert jedoch, dass dies in der gegebenen Situation nicht sein kann und sieht demnach keine Möglichkeit, dass die Geräte unterschiedliche Resultate bei der Messung erzielen. Ein Schüler schließt einen Unterschied bei den Messergebnissen aufgrund der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit aus, von der er fälschlicherweise annimmt, dass sie die Berücksichtigung von Signallaufzeiten hinfällig macht. Bei ihm kann keine Aussage darüber gemacht werden, ob er die idealen Messgeräte akzeptiert, oder Fehler für Unterschiede verantwortlich macht. Zwei Schüler machen sich Gedanken darüber, ob die Messgeräte miteinander verbunden sind. Drei Schüler formulieren die Aussagen über die Messergebnisse ganz eindeutig in Aussagen über einen tatsächlichen, objektiven Ablauf um. Hierbei wird die Vorstellung einer absoluten Zeit besonders deutlich. Die anderen Schüler tätigen teilweise ähnliche, aber nicht ganz eindeutige Aussagen.

Alle 13 befragten Schüler haben Probleme mit der Relativität der Gleichzeitigkeit. Zehn Schüler finden sie komisch, nicht intuitiv und meinen sie verstünden sie nicht, oder sie ergebe keinen Sinn. Sieben Schüler versuchen sofort eine Erklärung zu finden und sind offenbar neugierig. Fünf der befragten Schüler meinen, es müsse sich um einen Messfehler handeln und drei davon bringen Signallaufzeiten ins Spiel.

6.4. Relativität von Raum und Längen

Für das Gespräch zur Relativität von Raum und Längen dienen die folgenden Fragen als Leitfaden.

Frage 1: Raumschiff B bewegt sich mit einer Relativgeschwindigkeit von $v = 100000 \text{ km/s}$ an Raumschiff A vorbei. Auf beiden Raumschiffen befinden sich Messgeräte, die die Länge von Objekten messen können. Auf Raumschiff B befindet sich eine Bowlingbahn (Abb. 6.8). Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Länge der Bowlingbahn den Wert 18,3m. Welche Länge misst das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn? Begründe deine Antwort!

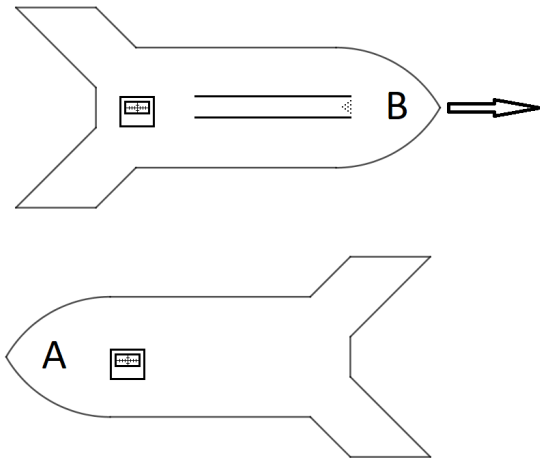


Abb. 6.8: Zu Frage 1. Die Länge einer Bowlingbahn auf Raumschiff B wird von Messgeräten auf beiden Raumschiffen gemessen.

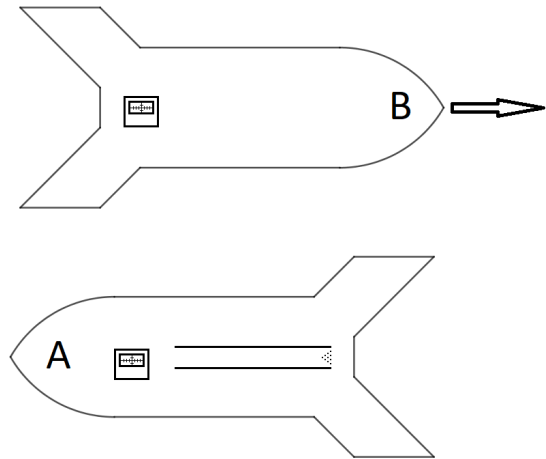


Abb. 6.9: Zu Frage 2. Die Länge einer Bowlingbahn auf Raumschiff A wird von Messgeräten auf beiden Raumschiffen gemessen.

Frage 2: Auf Raumschiff A befindet sich ebenfalls eine Bowlingbahn (Abb. 6.9). Das Gerät auf Raumschiff A misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3m. Welche Länge misst das Gerät auf Raumschiff B für die Bowlingbahn? Begründe deine Antwort!

Frage 3: Messungen in der Realität haben ergeben, dass das Gerät, das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt, immer eine kleinere Länge für die Bowlingbahn misst. Was sagst du zu dieser Tatsache?

Frage 4: Das Messgerät, das relativ zur Bowlingbahn ruht, und das andere, das sich relativ zu ihr bewegt, messen also unterschiedliche Ergebnisse für die Länge der Bahn. Gibt es dabei ein richtiges Ergebnis, oder haben etwa beide recht? Welches wäre das? Begründe deine Antwort!

Frage 5: Ein Raumschiff bewegt sich nun relativ zur Erde mit einer Relativgeschwindigkeit von $v = 100000 \text{ km/s}$. Auf der Erde befindet sich eine Bowlingbahn, und ein Messgerät auf der Erde misst für diese eine Länge von 18,3m (Abb. 6.10). Welchen Wert misst das Gerät auf dem Raumschiff? Welcher der Werte ist korrekt? Begründe deine Antwort!

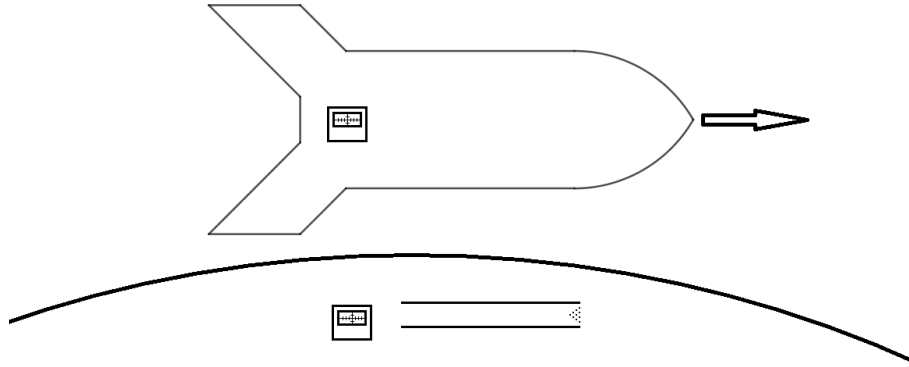


Abb. 6.10: Zu Frage 5. Die Länge einer Bowlingbahn auf der Erde wird von einem Messgerät auf der Erde und einem auf einem vorbeifliegenden Raumschiff gemessen.

Die Fragen 1 und 2 dienten zur Untersuchung der Vorstellungen der Schüler zu Raum und Längen. Nach der speziellen Relativitätstheorie misst das relativ zur Bowlingbahn bewegte Gerät immer eine kürzere Länge³⁸.

Mit Frage 3 sollte die Bereitschaft der Schüler, die Längenkontraktion anzunehmen, getestet werden.

Frage 4 wurde gestellt, um zu überprüfen, ob die Schüler das Relativitätsprinzip im Kontext der Längenkontraktion richtig anwendeten. Ihre Antworten sollten auch Auskunft darüber geben, worauf sie den gemessenen Unterschied zurückführen, und ob sie die Länge als eine unabhängig von der Messung vorhandene Eigenschaft ansahen, oder als eine durch die Messung definierte. Insbesondere ist die Längenkontraktion nicht die Folge eines Messfehlers. Wird das Relativitätsprinzip korrekt angewendet, so werden beide Messwerte als richtig und gleichberechtigt angesehen.

Mit Frage 5 sollte die Anwendung des Relativitätsprinzips durch die Schüler im Kontext der Längenkontraktion erneut getestet werden. Dabei sollte überprüft werden, ob die Erde als ausgezeichnetes Inertialsystem betrachtet wird. Eine korrekte Argumentation wäre analog zu jener bei Frage 4³⁹.

³⁸Für eine ausführliche Behandlung siehe Abschnitt 3.3.3.

³⁹Die beschleunigte Bewegung der Erde um die Sonne, die Erdrotation und Einflüsse durch die allgemeine Relativitätstheorie werden vernachlässigt.

6.4.1. Auswertung der Interviews zur Relativität von Raum und Längen

6.4.1.1 Schülervorstellungen zu Raum und Längen

Alle 13 befragten Schüler haben die Vorstellung von absoluten Längen.

Schülerin 1 erwartet, dass das Gerät auf Raumschiff A die gleiche Länge für die Bowlingbahn auf Raumschiff B misst, wie das Gerät auf Raumschiff B:

1 *S1: Auch 18,3.*

Zitat 243

Wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff B befindet, erwartet sie ebenfalls keinen Unterschied in den Messergebnissen:

1 *S1: (lacht) Auch 18,3 m(.?)*

Zitat 244

Nach der Besprechung der Längenkontraktion bezieht sie diese Überlegungen bei der Frage zum Messergebnis, den das Gerät auf dem Raumschiff für die Länge der Bowlingbahn auf Erde erhält, mit ein und erwartet ebenso eine Verkürzung:

1 *S1: Die gleiche Länge, 18,3 m.*

2 *B: Ok.*

3 *S1: Ah so ne, ja jetzt kürzer, weil wegen diesem Fehler, oder ... halben Fehler. (lacht)*

Zitat 245

Aus ihrer ersten Antwort wird klar, dass ihre Intuition wieder wäre, dass es keinen Unterschied in den Messwerten gibt. Schülerin 1 sieht Längen als absolut an.

Schüler 2 artikuliert deutlich, dass er Längen als unveränderlich ansieht und erwartet keinen Unterschied in den Messwerten:

1 *S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Da es sich um eine Länge handelt würde ich einfach,*
2 *würde ich auch sagen 18, 3m.*

3 *B: Ok. Wie meinst du das „da es sich um eine Länge handelt“?*

4 *S2: Ja es ... würde sich jetzt für mich so anhören als wäre es, ist es egal ob es sich das jetzt*
5 *in die eine Richtung weiterbewegt oder nicht, weil es ja eine Länge ist, die sich nicht*
6 *verändert.*

Zitat 246

Dies sieht er folgerichtig auch so, wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet:

1 *S2: Ich würde bei meiner Meinung bleiben, wieder 18,3 m sagen.*

Zitat 247

Bei der Besprechung des Messwerts, den das Gerät auf dem Raumschiff für die Länge der Bowlingbahn auf der Erde erhält, ist Schüler 2 unsicher, ob der Wert gleich ist wie jener, den das Gerät auf der Erde erhält, oder anders.

- 1 S2: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... (räuspert sich) Ich schwank grad zwischen zwei Werten.
2 B: Welche?
3 S2: Entweder sind diesmal wirklich die 18,3 ...
Zitat 248

Schüler 2 will zunächst die Bewegung der Erde mitberücksichtigen, womit er wahrscheinlich deren Bewegung um die Sonne meint⁴⁰. Es wird geklärt, dass nur die Relativgeschwindigkeit zu berücksichtigen ist. Er entscheidet sich schließlich dafür, den besprochenen Effekt der Längenkontraktion auf die Situation anzuwenden.

- 1 S2: Ja ich würde wieder sagen, dass das Raumschiff die ... den, äh, einen anderen Wert
2 misst.
3 B: Welchen? Länger? Kürzer?
4 S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... So wie's das ... andere Raumschiff... Wie war's im
5 anderen Beispiel?
- Zitat 249

Schüler 2 sieht Längen zunächst als absolut an, scheint jedoch bereit zu sein, dieses Konzept aufgrund neuer Erkenntnisse aufzugeben.

Schülerin 3 erwartet, dass beide Messgeräte das gleiche Ergebnis für die Länge der Bowlingbahn auf Raumschiff B erhalten:

- S3: 18,3 m(.*?) Zitat 250

Folgerichtig erwartet sie dies auch, wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet:

- 1 *S3: 18,3 m. (lacht)* Zitat 251

Bei ihrer Antwort zur Frage nach dem Wert, den das Messgerät auf dem Raumschiff für die Länge der Bowlingbahn auf der Erde erhält, bezieht sie das vorangegangene Gespräch über die Längenkontraktion mit ein:

- 1 S3: Ähm, eine kürzere Länge(.?) Zitat 252

Dabei merkt sie an, dass der Wert auf dem Raumschiff falsch sei:

- 1 S3: Ich glaub die ... das Messgerät auf der Erde ist richtig.(?)
Zitat 253

Für Schülerin 3 sind Längen absolute Eigenschaften von Objekten. Sie wendet zwar die Längenkontraktion bei nächster Gelegenheit an, hält aber daran fest, dass der Wert des relativ zur Bahn ruhenden Geräts korrekt ist.

Schüler 4 erwartet durch das bisherige Gespräch ein Ergebnis, das nicht mit seinem Bauchgefühl übereinstimmt, bestätigt aber, dass er intuitiv keinen Unterschied zwischen den Messergebnissen erwarten würde:

⁴⁰Vielleicht sogar die Bewegung des Sonnensystems um das Zentrum der Milchstraße. Spätestens bei der Betrachtung mehrerer Galaxien wird jedoch die Aussichtslosigkeit dieses Versuchs deutlich.

- 1 *S4: Also wahrscheinlich eine andere. (lacht)*
 2 *B: Wie kommst du zu dem Schluss?*
 3 *S4: Weil's bis jetzt immer so war. (lacht)*
 4 *B: Ok, aber was wär jetzt da dein Bauchgefühl dazu?*
 5 *S4: Ähm ... rein logisch gesehen wär es ja dieselbe Länge.*
 Zitat 254

Bei der Situation, in der sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet, erwartet er das gleiche Ergebnis:

- 1 *S4: ... logisch gesehen wieder dieselbe, aber wahrscheinlich sagt er jetzt ... länger(.?)*
 Zitat 255

Für den Messwert, den das Gerät im Raumschiff für die Länge der Bowlingbahn auf der Erde erhält erwartet er nach dessen Besprechung ebenfalls den Effekt der Längenkontraktion:

- 1 *S4: ... heißt wahrscheinlich wieder kürzer(.?) Eine kürzere Länge?*
 Zitat 256

Prinzipiell stellt sich Schüler 4 Längen als absolute Eigenschaft von Körpern vor, er scheint jedoch bereit zu sein, dieses Konzept aufzugeben.

Schüler 5 erwartet, dass beide Messgeräte den gleichen Wert für die Länge der Bowlingbahn auf Raumschiff B erhalten:

- 1 *S5: ... ähm ... dieselbe, ... also ... wie viel waren's? 18 Komma ...*
 2 *B: 18,3, ja.*
 3 *S5: ... 18,3, ja.*
 Zitat 257

Er erwartet auch keinen Unterschied, wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet:

- 1 *S5: ... ähm, wieder denselben.*
 2 *B: Ok.*
 3 *S5: Also auch 18,3.*
 Zitat 258

Auch nach der Besprechung der Längenkontraktion sagt er für den Wert, den das Messgerät auf dem Raumschiff für die Länge der Bowlingbahn auf der Erde erhält, den gleichen Wert voraus:

- 1 *S5: Ähm ... ja ich würd wieder sagen dieselbe, also ... ähnliche Situation wie vorhin eigent-*
 2 *lich.*
 Zitat 259

Schüler 5 hat eine tief verankerte Vorstellung von absoluten Längen.

Schülerin 6 erwartet, dass beide Messgeräte zum gleichen Ergebnis für die Länge der Bowlingbahn auf Raumschiff B gelangen:

1 *S6: (lacht) Ich hätte wieder gesagt auch 18,3.*

Zitat 260

Folgerichtig nimmt sie dies auch für den Fall an, dass sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet:

1 *S6: Auch wieder das Gleiche?*

Zitat 261

Sie erwartet aufgrund des Gesprächs über die Längenkontraktion auch, dass das Gerät auf dem Raumschiff für die Länge der Bowlingbahn auf der Erde einen anderen Wert misst, wendet die Längenkontraktion jedoch nicht richtig an. Sie meint auch, dass sie ohne die vorangegangenen Aufgaben einen gleichen Messwert erwartet hätte:

1 *S6: Eine andere Länge anscheinend(.?) (lacht)*

2 *B: Und was für eine würdest du sagen? (lacht)*

3 *S6: (lacht) ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich hätte gesagt länger ...*

4 *B: Mhm. Und was wär so generell dein Bauchgefühl dazu?*

5 *S6: ... ja also ... so ohne die vorherigen Aufgaben hätt' ich gesagt, dass es ... gleich lang*

6 *is, aber ... wenn die anderen Aufgaben halt das auch is, halt dann dass es eine andere*

7 *Länge is, dann wird's da auch eine andere Länge sein.*

Zitat 262

Schülerin 6 versteht unter der Länge eine absolute Eigenschaft eines Körpers.

Schülerin 7 erwartet, dass das Gerät auf Raumschiff A die gleiche Länge für die Bowlingbahn auf Raumschiff B misst wie das dort platzierte Messgerät:

1 *S7: Auch 18,3 m(.?)*

Zitat 263

Das gleiche Ergebnis erwartet sie folgerichtig auch für den Fall, dass sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet:

1 *S7: Auch 18,3 m(.?)*

Zitat 264

Nach dem Gespräch über die Längenkontraktion wendet sie diese für den Fall, dass die Länge einer Bowlingbahn auf der Erde von einem vorbeifliegenden Raumschiff aus gemessen wird an:

1 *S7: Eine kürzere ... also nicht ... 18,3, sondern irgendwas darunter.*

2 *B: ... Und warum?*

3 *S7: Weil wir das davor schon gesagt haben?*

4 *B: Ok.*

5 *S7: Und ... weil ... die Distanz zwischen der Rakete und der Erde ja so hoch ist, dass ...*

6 *sich eine Krümmung ergibt(.?)*

Zitat 265

Dabei erwartet sie offenbar auch einen Einfluss der Krümmung der Erdoberfläche. Sie erklärt jedoch, dass sie ohne die vorangegangenen Aufgaben keinen Unterschied zwischen den Ergebnissen der beiden Messgeräte erwartet hätte:

- 1 *S7: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Jetzt hätte ich gesagt das ist wieder gleich lang, aber*
 2 ...

Zitat 266

Schülerin 7 hat offenbar die Vorstellung, dass die Länge eine absolute Eigenschaft eines Körpers ist, sie scheint jedoch bereit zu sein, dieses Konzept aufzugeben.

Schülerin 8 erwartet, dass das Gerät auf Raumschiff A das gleiche Ergebnis für die Länge der Bowlingbahn auf Raumschiff B erhält wie das dort platzierte Messgerät:

- 1 *S8: Ja ... ich würde sagen ... 18,3m?*

Zitat 267

Die Gleichheit der Messergebnisse nimmt sie folgerichtig auch für den Fall an, dass sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet:

- 1 *S8: (lacht) 18,3 m. (lacht)*

Zitat 268

Schülerin 8 versucht nach einem Gespräch über die Längenkontraktion, diese auf die Messung der Länge einer Bowlingbahn auf der Erde aus einem vorbeifliegenden Raumschiff zu übertragen, was ihr jedoch nicht gelingt. Dabei bemerkt sie auch, dass sie ohne dem vorangegangenen Gespräch von gleichen Messergebnissen für die beiden Geräte ausgegangen wäre:

- 1 *S8: Mhm ... vorhin war's kürzer(?.)*
 2 *B: Ok und was würdest du aus dem Bauch heraus sagen?*
 3 *S8: Länger. (lacht)*
 4 *B: Länger, ok.*
 5 *S8: Das Gegenteil. (lacht)*
 6 *B: Und wenn du das vorher vernachlässigen würdest, was wäre dann dein Gefühl gewesen?*
 7 *S8: Gleich.*

Zitat 269

Schülerin 8 sieht die Länge als eine absolute Eigenschaft eines Körpers an.

Schüler 9 macht sich erneut Gedanken über den Messprozess und überlegt, ob die Position des Messgeräts einen Einfluss haben könnte. Dabei gelangt er wieder zur Auffassung, dass es einen Messfehler geben wird:

1 S9: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... der (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) misst 18,3 m
 2 ... ähm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... also Strecken verändern sich ja nicht bei
 3 Bewegung, eine Strecke bleibt gleich, weil die Strecke ist definiert. Jedoch ... ahm ...
 4 hmhm ... ich könnte mir wieder vorstellen, dass ein Messfehler vorhanden ist, weil,
 5 ahm, ... ich, ich brauche eine gewisse Zeit, ich muss ja den ersten Punkt sehen und
 6 wenn ich, keine Ahnung, mit so einem Laserstrahl messe, zum Beispiel, braucht das ja,
 7 bis es reflektiert wird und dann kann ich sehen, wie weit es entfernt ist und wenn ich
 8 mich währenddessen, äh, sich das Objekt dabei bewegt ... dann ... variiert das Ganze
 9 auch so. Also wenn wir genau jetzt in dem Moment berech-, äh ... messen ... ist das so
 10 ... ist das, ist das egal, kann er sich hier stellen, hier stellen, hier stellen, hier stellen?
 11 B: Ja.
 12 S9: Ok. ... Dann, äh ... glaube ich, dass wieder ein Messfehler auftreten wird ... ein
 13 minima-, also je nachdem wie schnell halt das Messgerät ist.
 14 B: Ja.
 15 S9: Und ... ja, dass es vielleicht einen minimal anderen Wert ... angibt, also ...

Zitat 270

Nach einem erneuten Hinweis, dass eine ideale Messung betrachtet wird, bemerkt er, dass er erwartet, dass das Gerät auf Raumschiff A den gleichen Wert für die Länge der Bowlingbahn erhält wie das Gerät auf Raumschiff B. Nachdem er die gleiche Argumentation zu einem Messfehler auch in dem Fall durchführt, dass sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet, meint er, nach einem erneuten Hinweis, dass das Messgerät Effekte der Lichtlaufzeit berücksichtigt, dass wiederum beide Geräte das gleiche Ergebnis erhalten:

1 S9: Genau, deshalb ... würde es wieder 18,3 m messen.

Zitat 271

Schüler 9 wendet die Längenkontraktion nach einem Gespräch über diese auch auf den Fall an, dass ein Messgerät in einem an der Erde vorbeifliegenden Raumschiff die Länge einer Bowlingbahn auf der Erde misst. Dabei sieht er jedoch wieder einen Messfehler als Ursache:

1 S9: Also wir haben festgestellt ... wir haben jetzt wieder, wir haben jetzt festgestellt vorhin
 2 schon, ... dass das Raum-, äh, das Messgerät was Kürzeres messen muss anscheinend,
 3 weil das ... ja bewiesen wurde, ähm ...
 4 B: Ok und was wäre aber dein, dein Bauchgefühl?
 5 S9: Mein Bauchgefühl wäre dabei ... Bowlingbahn auf der Erde, das Messgerät ... (7 Se-
 6 kunden Pause; Anm.) ... also irgendwie macht's Sinn, dass die Bewegung das ... das
 7 Messereignis, oder die, die Länge, die gemessen wird beeinflusst ... aber ich, ich kann's
 8 hier nicht rationalisieren, weil wenn's, falls ich's rationalisiere komme ich wieder zurück
 9 zu meinem ... Strecke bleibt gleich und ... alles andere macht keinen Sinn.

Zitat 272

Bei seiner Argumentation wird deutlich, dass er davon ausgeht, dass Längen unveränderlich sind. Schüler 9 sieht die Länge somit als eine absolute Eigenschaft eines Körpers an.

Schülerin 10 meint, dass man Längen genauer messen könne als Zeit, schließt aber dennoch nicht aus, dass die Messgeräte zu verschiedenen Werten für die Länge der Bowlingbahn auf Raumschiff B gelangen:

1 *S10: ... Wenn wir davon ausgehen, ahm ... dass diese ... ahm ... Messgeräte von vorher*
2 *auch nicht, ahm ... gleich ... oder ähnlich ... messen konnten, dann würde ich hier auch*
3 *sagen, dass Länge und Zeit, ahm ... schon irgendwie ähnlich sind, ich glaube Länge kann*
4 *man ein bisschen genauer messen als ... Zeit, bzw. wann irgendwas eingeschalten wird.*
5 *Deswegen würde ich ... nicht ausschließen, dass sie das gleiche Ergebnis bekommen, aber*
6 *es könnte schon, dass ... was anderes rauskommt.*
7 *B: Ok. Und wenn wir davon ausgehen, dass die Messgeräte tatsächlich perfekt messen?*
8 *S10: Ähm, trotzdem ... genauso, also ich würde nicht ausschließen sie ... dann auch gleich*
9 *sind, aber auch nicht, dass es nicht stimmt ... was die beiden ... rausbekommen.*

Zitat 273

Dabei denkt sie offenbar an einen Messfehler. Als Ursache dafür nennt sie die Entfernung und die Geschwindigkeit:

1 *S10: Ahm, ich glaube Entfernung und ... Geschwindigkeit(?.?)*

Zitat 274

Folgerichtig nimmt sie auch in dem Fall, dass sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet einen kleinen Messfehler an:

1 *S10: ... Ich glaube umgekehrt, ahm ... geht es genauso und ... ahm ... es ist halt un-*
2 *terschiedlich wo sich die Messgeräte befinden, aber trotzdem ... glaube ich nicht, dass*
3 *es irgendwas ausmacht ahm ... ich würde noch immer sagen, dass es, ahm ... davon*
4 *abhängt wie sich diese Raumschiffe bewegen beziehungsweise wie schnell und wie weit*
5 *voneinander.*

Zitat 275

Aus ihrer Reaktion auf die Längenkontraktion wird klar, dass sie dabei nur an einen Messfehler denkt:

1 *S10: Also ... ich finde es überraschend, dass es, ahm ... kürzer ist dann, also ich hätte*
2 *schon gesagt, dass es nicht, wahrscheinlich nicht stimmt, oder nicht immer stimmt, aber*
3 *... ich find's irgendwie ... komisch, dass es dann immer kürzer herauskommt.*

Zitat 276

Diese Annahme wird durch ihre Betrachtung der Situation, in der die Länge einer Bowlingbahn auf der Erde von einem Messgerät in einem vorbeifliegende Raumschiff gemessen wird bestätigt:

1 *S10: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm, also ich glaube die Werte sind, oder werden*
2 *wahrscheinlich, oder ganz sicher wieder unterschiedlich sein. Ahm und ich würde sagen,*
3 *dass das Messgerät auf der Erde genauer ist, oder ... richtig ist. Und ... ahm ich würde*
4 *sagen, ähm, dass diese Messgerät, ähm ... wahrscheinlich, ähm ... bisschen mehr Länge,*
5 *oder ein bisschen kürzer ... kürzere Längen, oder längere Längen angibt ... als ... was*
6 *eigentlich ... ist.*

Zitat 277

Insbesondere spricht sie davon, „was eigentlich ist“. Aus diesen Aussagen wird klar, dass Schülerin 10 die Länge als eine absolute Eigenschaft eines Körpers betrachtet.

Schüler 11 erwartet, dass das Gerät auf Raumschiff A für die Länge der Bowlingbahn auf Raumschiff A das gleiche Ergebnis erhält, wie das dort platzierte Messgerät, kann dies jedoch nicht begründen und scheint zu raten:

- 1 *S11: Was mein Bauchgefühl, ah ... boah, ich sage A, B, A (lacht), es wird wieder das Gleiche*
 2 *sein.*
 3 *B: Ok.*
 4 *S11: Also ... das kann ich jetzt auch wirklich nicht erklären, aber ...*

Zitat 278

Er verknüpft offenbar keine konkrete Vorstellung mehr mit der Situation. In seiner weiteren Argumentation lässt er das Relativitätsprinzip außer Acht und nimmt für den Fall, dass sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet, eine Unschärfe an, sodass er ein anderes Ergebnis erwartet:

- 1 *S11: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... da hat sich das bewegt und da bewegt sich das andere*
 2 *... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... äh ... ich sage, es wird ... ich sage eigentlich es*
 3 *wird eine Unschärfe haben, bei der Messung.*
 4 *B: Wenn die Messung exakt ist.*
 5 *S11: Ok, die Meschung, die Messung ist geschafft. (lacht) Ok, dann sage ich ... hm ... (3*
 6 *Sekunden Pause; Anm.) ... ich sage es, es wird nicht gleich sein, aber in dem Punkt*
 7 *kann ich ... leider, aber ich bin ganz ehrlich, ich werde, ich rate nur an diesem Punkt,*
 8 *weil ... für mich ist es schwer ... wenn ich mir das visuell nicht vorstellen kann ...*
 9 *das herzuleiten ... und wenn bei anderen Sachen, bei Messgeräten, man kann sich ja die*
 10 *Wellen vorstellen, man kann sich und so weiter und dann kann man sich das ein bisschen*
 11 *herleiten, wie sich das bewegt mit den bewegenden Körpern und da wenn wir hier einfach*
 12 *k-, k-, kein Viso haben ist das für mich ein bisschen schwer. Aber, ... äh, ich sage es*
 13 *wird anders sein ... aus Gefühl.*

Zitat 279

Er gibt dabei zu, dass er nur rät. In der Situation, dass die Länge einer Bowlingbahn auf der Erde von einem Messgerät in einem vorbeifliegenden Raumschiff gemessen wird, wendet er die zuvor besprochene Längenkontraktion an:

- 1 *S11: Naja, es, ist es ja nicht eigentlich genau dasselbe wie da hier? Äh, weil, das ist ja auch*
 2 *einfach ein ... sie stehen ja auch in Relation und das bewegt sich nicht, also ... wir*
 3 *an-, nehmen an das (Messgerät auf der Erde; Anm.) bewegt sich nicht und die Erde*
 4 *natürlich auch nicht, oder ... auch nur geringer ... und das be- ... bewegt sich halt,*
 5 *also Raumschiff bewegt sich halt, also ich würde sagen es ist genau dasselbe wie da.*

Zitat 280

Er erkennt richtig, dass die Situation äquivalent zur davor betrachteten ist⁴¹. Seine Vorstellung von Längen wird in einer Aussage deutlich:

⁴¹Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie können bei der Erde aufgrund der geringen Größenordnung außer Acht gelassen werden.

1 S11: Hm, finde ich es unerwartet ... es ist die Länge die hier ... ok. Ja, ich finde, ich finde
2 es ist unerwartet, weil, ähm, wir nehmen ja normalerweise an, dass die ... das halt die
3 Länge von etwas konstant ist.

Zitat 281

Er nimmt also an, dass die Länge eines Körpers eine absolute Eigenschaft ist. Im Gesprächsverlauf zeigt sich jedoch, dass er bereits zuvor von der Relativität der Zeit gehört hat:

1 *S11: Aber ich glaube, ich glaube es ist ... gar nicht so unerwartet, wenn man ein bisschen aus*
 2 *der Box rausdenkt, weil Zeit ist ja eigentlich auch, äh, rela-, äh, also ... nicht relativ,*
 3 *sondern halt abhängig.*

Zitat 282

Er erwähnt, dass er davon in einer Wissenschaftszeitschrift, die ein Familienmitglied abonniert hat, erfahren hat. Offenbar hält er es aufgrund seines Vorwissens für möglich, dass Längen keine absoluten Größen sind.

Schülerin 12 erwartet, dass beide Messgeräte den gleichen Wert für die Länge der Bowlingbahn auf Raumschiff A erhalten:

1 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... auch 13,8?
Zitat 283

Dies nimmt sie folgerichtig auch für den Fall an, dass sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet:

1 *S12: ... (19 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich hätte jetzt auch gesagt genau dasselbe. (lacht)*
Zitat 284

Nach einem Gespräch über die Längenkontraktion wendet sie diese auch auf den Fall an, dass die Länge einer Bowlingbahn auf der Erde von einem Messgerät in einem vorbeifliegenden Raumschiff gemessen wird, merkt jedoch an, dass sie ohne dem vorangegangenen Gespräch wiederum gleiche Messergebnisse erwartet hätte:

1 S12: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass sie kürzer ist? ... Also, dass die Bahn ...
2 kürzer ist hätte ich jetzt gesagt.

3 *B: Mhm. Weil?*

4 S12: Ähm, weil Sie mir vorher gesagt haben, dass die Bahn ... auf dem anderen Gerät kürzer
5 gemessen würde.

6 *B: Und was wäre dein Bauchgefühl?*

7 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Also wenn sie es mir nicht erklärt hätten, dann hätte
8 ich jetzt auch gesagt, dass es dieselbe Länge wäre ...

Zitat 285

Schülerin 12 hat eine Vorstellung von Längen als absoluten Größen.

Schülerin 13 bringt zunächst Messfehler aufgrund von Verzerrungen die durch die Relativbewegung verursacht werden ins Spiel:

1 *S1: (lacht) Ja klarer Fall von Fehler.*

Zitat 291

Bei der erneuten Besprechung der Längenkontraktion bei der Aufgabe, in der sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet, bestätigt sie, dass es sich um einen Messfehler handeln muss:

1 *S1: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Wegen der Geschwindigkeit und irgendwelchen ...*
2 *Abständen ... in der Physik von ... was weiß ich (lacht). B: (lacht) Was für Abstände,*
3 *was meinst du damit?*
4 *S1: Äh, ... vielleicht weil die ein bisschen weiter weg ist und halt nicht direkt neben...*
5 *B: Also würdest du wieder sagen Messfehler.*
6 *S1: Ja.*

Zitat 292

Schülerin 1 betrachtet die Längenkontraktion als Messfehler und ist nicht bereit, die Vorstellung absoluter Längen aufzugeben.

Schüler 2 meint, dass die Längenkontraktion nicht viel Sinn ergibt:

1 *S2: Ok. (lacht)*
2 *B: Was sagst du dazu?*
3 *S2: Ja ergibt wieder mal ... nicht so viel Sinn. (lacht)*

Zitat 293

Schüler 2 kann die Längenkontraktion nicht nachvollziehen, wendet sie jedoch bei nächster Gelegenheit konsequent an und ist offenbar bereit, seine Vorstellung von absoluten Längen aufzugeben.

Schülerin 3 meint, dass die Längenkontraktion an der Geschwindigkeit liegen könnte:

1 *S3: Naja, dass die Geschwindigkeit vielleicht dann ... ?*

Zitat 294

Dabei denkt sie offenbar an einen Messfehler:

1 *S3: Vielleicht, dass die Bahn quasi verzerrt wird, weil sie sich da so ... bewegt. (lacht)*

Zitat 295

Schülerin 3 kann sich die Längenkontraktion nur durch eine Verzerrung erklären und scheint nicht bereit zu sein, die Vorstellung absoluter Längen aufzugeben.

Schüler 4 meint, dass die Längenkontraktion keinen Sinn ergibt:

1 *S4: ... ergibt wieder keinen Sinn. (lacht)*

Zitat 296

Dennoch ist er, wenn auch aus falschen Gründen, offenbar dazu bereit die Längenkontraktion als tatsächlichen Effekt anzuerkennen:

- 1 *S4: Weil ... wir haben auch schon in Physik klassische und Quantenphysik, vielleicht is ...*
 2 *das eine in der klassischen richtig und das andere in der Quantenphysik?*

Zitat 297

Dabei denkt er jedoch offenbar nicht daran, dass dies bedeuten würde, dass Längen keine absoluten Größen sind.

Schüler 5 meint die Längenkontraktion klinge unlogisch und kann sie nur durch eine verfälschte Messung erklären:

- 1 *S5: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... klingt, ähm, unlogisch und nicht einleuchtend*
 2 *für mich, weil ... sich ja die Bowlingbahn, vor allem, wenn jetzt das stillstehende Raum-*
 3 *schiff quasi, darauf sich die Bowlingbahn ... befindet nicht einfach die Länge ändert.*
 4 *Beim Bewegen kann ich, könnte man's vielleicht noch verstehen, weil durch ...*
 5 *B: Mhm.*
 6 *S5: ... Bewegen, dass da irgendwas verfälscht wird dadurch, oder sowas in die Richtung ...*
 7 *B: Mhm, ok.*
 8 *S5: ... aber wenn das stillsteht, dann ...*

Zitat 298

Im Gegensatz dazu meint er später jedoch, dass er sich vorstellen könne, dass die Längenkontraktion auftrete, er diese jedoch nicht intuitiv finde:

- 1 *S5: ... (5 Sekunde Pause; Anm.) ... hmm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich mein im*
 2 *Endeffekt wieder, ich könnt's mir vorstellen, dass so is ... auf jeden Fall, aber es wär*
 3 *halt nicht ... das Erste woran ich, also das ... wie ich es sehen würde.*

Zitat 299

Schüler 5 sieht die Längenkontraktion als Messfehler an, scheint jedoch bereit zu sein, sich auf sie einzulassen.

Schülerin 6 macht sich Gedanken über den Messprozess und sieht in diesem die Ursache für die Längenkontraktion:

- 1 *S6: Ja, vielleicht, weil's halt den Anfang misst, dann vergeht die Zeit wo's ... vorbei geht und*
 2 *dann misst's das Ende und dann is es ja insgesamt kürzer, weil sich's ja selber bewegt*
 3 *hat.*

Zitat 300

Dabei wird deutlich, dass sie nicht an die Definition des Messprozesses im Sinne der Relativitätstheorie und die Auswirkung der Relativität der Gleichzeitigkeit denkt, sondern an nicht berücksichtigte Bewegung und somit an einen Fehler. Ihre Gedanken zum Messprozess könnten jedoch eine gute Basis für die Behandlung der Relativitätstheorie sein. Später bestätigt sie, dass sie an einen Messfehler denkt:

- 1 *S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, also ...*
 2 *ich hätt' das ja wieder halt gedacht wegen dem Anfang und dem ... Endpunkt, da sich*
 3 *das dann bewegt, dass dann ... vielleicht kürzer is deswegen, weil's halt ... woanders is.*
 4 *B: Ok. Also ... eigentlich ein Messfehler quasi, weil das nicht berücksichtigt wird.*

5 S6: ... Äh, ja. (lacht)

Zitat 301

Schülerin 6 sieht die Längenkontraktion als einen Messfehler.

Schülerin 7 meint, die Längenkontraktion mache Sinn und sieht ebenfalls im Messprozess deren Ursache und führt sie somit auf einen Messfehler zurück:

1 S7: Ah ok das macht schon Sinn, weil, es bewegt sich ja ... so und dann ... wird das so
2 zusammengeschoben jetzt quasi ... und es ergibt schon Sinn, dass es ... wenn das vor-
3 beigeht, dass das was dann gemessen wird quasi so ... der Anfangspunkt wird gemessen
4 dann bewegt sich's und dann wird der Endpunkt kürzer gemessen als, ... als das wirklich
5 ist.

Zitat 302

Sie meint die Geschwindigkeit müsste miteinberechnet werden, kann jedoch keine Erklärung für die Längenkontraktion mehr finden, wenn diese trotz der Berücksichtigung auftritt:

1 S7: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) Ja da muss die Geschwindigkeit auch mitein-, einberechnet
2 werden?
3 B: Ist berücksichtigt.
4 S7: ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... Keine Ahnung.

Zitat 303

Schülerin 7 sieht die Längenkontraktion als Folge eines Messfehlers an.

Schülerin 8 sieht als Ursache für die Längenkontraktion einen Messfehler, da das Messgerät die Länge aufgrund der Relativbewegung nicht erfassen könne:

1 S8: ... Ähm, ok erst mal und wahrsch-, vielleicht, dass es zusammenhängt mit ... eben,
2 wenn sich jetzt ... B bewegt und ... A die Bahn hat, dass es sich deswegen vielleicht
3 verkürzt ...
4 B: Ok.
5 S8: ... und das Messgerät deswegen eine andere Länge misst.
6 B: Mhm. Und was, was führt jetzt genau dazu, dass das das andere misst?
7 S8: Die ... Bewegung einer Rakete.
8 B: Ok und wie wirkt sich die aus?
9 S8: Eben das, vielleicht irgendwie dadurch, dass es ... ein stillstehendes ... Objekt, also
10 wenn man davon ausgeht, dass ... Raumschiff A ... sich nicht bewegt ... und B relativ
11 dazu ... weg, oder halt in die andere Richtung und das so schnell ist, also halt 100.000 ...
12 irgendwas (lacht) ähm ... dass es ... sich ... irgendwie nicht hinterher kommt, oder
13 aufgrund der Geschwindigkeit ein ... falsches ... Ergebnis produziert, bzw. die Länge
14 nicht komplett ... erfassen kann.

Zitat 304

Bei der Situation, in der die Länge einer Bowlingbahn auf der Erde gemessen wird, überlegt sie, ob die Bewegung der Erde eine Auswirkung haben könnte:

1 S8: (lacht) Ist genau das, was ich nicht gedacht habe.
 2 B: Ok, ja. (lacht)
 3 S8: Weil, ... ich meine ... von vorher habe ich ja auch gesagt mit der Geschwindigkeit, das
 4 könnte jetzt auch wieder sein.
 5 B: Ok.
 6 S8: Ach ja, und wenn man ... die Erde dreht sich ja auch ... deswegen dachte ich vielleicht
 7 ...

Zitat 305

Schülerin 8 meint, dass die Längenkontraktion die Folge eines Messfehlers ist.

Schüler 9 erklärt, dass die Längenkontraktion für ihn intuitiv Sinn ergibt, wobei dies an seiner Vorstellung des Messprozesses und der Miteinbeziehung der Lichtlaufzeit liegt:

1 S9: ... Also rein intuitiv ergibt's Sinn für mich.
 2 B: Ja.
 3 S9: Kann auch sein, dass es nur an der Zeichnung liegt, weil das, äh Messgerät sich praktisch
 4 weiter rüber bewegen würde und ich so, ... mir das so vorstelle, dass es so ... mit so
 5 einem Strahl gemessen wird.
 6 B: Ok.
 7 S9: Ähm ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... Jetzt ich kann's nicht erklären, aber rein intuitiv
 8 macht's schon Sinn.

Zitat 306

Nach einer Klarstellung, dass es nicht an der spezifischen Messung liegt, erklärt er deutlich, dass es ein Messfehler sein müsse:

1 S9: Also ... einfach irgendein Objekt bewegt sich ...
 2 B: Und ein Messgerät relativ dazu und ich würde eine kürzere Länge messen.
 3 S9: Als das Messgerät, das ... auf dem ... davor ist praktisch.
 4 B: Das ... dabei ist, ja.
 5 S9: ... Die bewegen sich ... (21 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... also ich hänge bei dem,
 6 ich hänge bei der ... bei der Tatsache, dass eine Strecke für mich ja immer gleichbleibt,
 7 ähm ... und deshalb ... ist derweil das einzig Logische für mich, dass es ein Messfehler
 8 sein muss, weil ... eine Strecke, die Strecke, die gemessen wird, verändert sich ja de-,
 9 demnach nicht, oder?

Zitat 307

Schüler 9 kann sich die Längenkontraktion nur durch einen Messfehler erklären, da er Längen als unveränderlich ansieht. Seine zahlreichen Bemerkungen zu Messfehlern lassen auch vermuten, dass er die Tatsache, dass reale Messungen nie exakt sein können, gut verinnerlicht hat⁴². Dies macht es ihm offenbar schwer, in Gedankenexperimenten ideale Messgeräte anzunehmen.

Schülerin 10 findet die Längenkontraktion überraschend und komisch:

⁴²Dies ist bemerkenswert, da er nicht den naturwissenschaftlichen Zweig besucht und somit keinen Laborunterricht hatte.

- 1 *S10: Also ... ich finde es überraschend, dass es, ähm ... kürzer ist dann, also ich hätte*
 2 *schon gesagt, dass es nicht, wahrscheinlich nicht stimmt, oder nicht immer stimmt, aber*
 3 *... ich find's irgendwie ... komisch, dass es dann immer kürzer herauskommt.*

Zitat 308

Schüler 11 sucht nach einer Erklärung und findet die Längenkontraktion unerwartet:

- 1 *S11: Hm, finde ich es unerwartet ... es ist die Länge die hier ... ok. Ja, ich finde, ich finde*
 2 *es ist unerwartet, weil, ähm, wir nehmen ja normalerweise an, dass die ... das halt die*
 3 *Länge von etwas konstant ist.*

Zitat 309

Er ist offenbar dazu bereit, die Vorstellung von absoluten Längen aufzugeben, da er bereits gelesen hat, dass die Zeit relativ ist:

- 1 *S11: Aber ich glaube, ich glaube es ist ... gar nicht so unerwartet, wenn man ein bisschen aus*
 2 *der Box rausdenkt, weil Zeit ist ja eigentlich auch, äh, rela-, äh, also ... nicht relativ,*
 3 *sondern halt abhängig.*

Zitat 310

Schüler 11 findet die Längenkontraktion zwar unerwartet und kann keine Erklärung dafür finden, sie überrascht ihn jedoch nicht völlig. Mit der Relativität der Zeit ist er auch einem Ansatz für die Herleitung der Längenkontraktion auf der Spur.

Schülerin 12 findet keine Erklärung für die Längenkontraktion und hätte gerne eine:

- 1 *S12: (lacht) Warum? ... Ähm, also ich wüsste, also ich hätte jetzt keine Erklärung dafür.*

Zitat 311

Schülerin 12 kann sich die Längenkontraktion nicht erklären, scheint jedoch bereit zu sein diese zu akzeptieren und ist neugierig.

Schülerin 13 meint, die Längenkontraktion mache keinen Sinn:

- 1 *S13: (lacht) ... Macht keinen Sinn, ich verstehe, ich ... für mich macht das keinen Sinn,*
 2 *weil sie ... bewegen sich ja trotzdem zueinander ... immer ... in dersel-, also ... es*
 3 *kommt natürlich darauf an, von wo man es betrachtet, aber ja, ok, gut.*

Zitat 312

6.4.1.3 Relativitätsprinzip und das erdfeste System im Kontext der Relativität von Raum und Längen

Nur einer der 13 befragten Schüler macht einen Unterschied zwischen der Betrachtung der Situation mit zwei Raumschiffen und jener mit einem Raumschiff und der Erde. Nur zwei scheinen das Relativitätsprinzip im gegebenen Kontext korrekt anzuwenden.

Schülerin 1 sieht das Ergebnis des Messgeräts, das sich im gleichen Raumschiff wie die Bowlingbahn befindet, als richtig an:

1 *S1: ... Ich hätt gesagt das von dort, wo die Bowlingbahn ist, weil das genauer ist, weil es so*
2 *direkt ... daneben ist.*

Zitat 313

Dieser Argumentation bleibt sie auch treu, wenn sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet:

1 *S1: Ja, ich hätt gesagt das (Ergebnis des Messgeräts auf der Erde; Anm.) ist richtig und das*
2 *(Ergebnis des Messgeräts auf dem Raumschiff; Anm.) ist falsch. Also halt, ... nicht so*
3 *falsch, aber wenn man es berücksichtigt, kommt man wahrscheinlich dann irgendwie auf*
4 *das.*
5 *B: Ok. Und was, wenn man es berücksichtigt und trotzdem eine kürzere Länge misst?*
6 *S1: Ja dann hat man falsch gerechnet. (lacht)*

Zitat 314

Schülerin 1 betrachtet den Messwert des Geräts, das sich im gleichen System wie die Bowlingbahn befindet als richtig. Sie macht keinen Unterschied zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schüler 2 sieht das Ergebnis des Geräts, das sich im gleichen Raumschiff wie die Bowlingbahn befindet als richtig an, meint jedoch, dass der andere Wert auch nicht falsch sei:

1 *S2: Ich würde grundsätzlich den der bei de, ... bei der Bowlingbahn ist, am selben Raumschiff*
2 *als, als richtig ansehen für uns auf der, für uns zumindestens. Aber ich vermute der andere*
3 *Messwe-, also andere Wert hat auch seine Richtigkeit, weil halt, wird halt irgendwie ...*
4 *irgendwas anderes noch miteinbezogen in diese Messung.*
5 *B: Was meinst du?*
6 *S2: Irgendwelche anderen Parameter, irgendeine Relativitätstheorie, irgendwas wird da mit-*
7 *einbezogen.*

Zitat 315

Der gleichen Argumentation folgt er, wenn sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet:

1 *S2: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Für uns wär wieder, für uns wär der ... Wert vom*
2 *Messgerät der richtige, weil wir eben auf der Erde, vom Messgerät auf der Erde wär's*
3 *der richtige, weil wir auf der Erde leben und ... das halt unsere Werte sind mit denen*
4 *wir leben, aber ... der vom Raumschiff würde auch irgendwie wieder seine Richtigkeit*
5 *haben.*
6 *B: Mhm. Ähm, könnten sich die irgendwie einigen, die am Raumschiff und die auf der Erde,*
7 *oder ist das ein unüberbrückbarer Konflikt, wie lang diese Bowlingbahn ist?*
8 *S2: Ich würde jetzt so mal keine Einigung sehen, man müsste halt ... irgendwas ... rausfin-*
9 *den.*

Zitat 316

Es wird in beiden Fällen nicht klar, was er damit meint, dass die anderen Werte ebenfalls ihre Richtigkeit hätten, jedoch antwortet er auf Nachfrage, dass er den Wert der vom Gerät, das sich im gleichen System wie die Bowlingbahn befindet gemessen wird, eher als richtig ansehen würde:

1 *S2: Ja, der bei der Bowlingbahn.*

Zitat 317

Schüler 2 sieht den jeweils im System der Bowlingbahn gemessenen Wert als richtig an, räumt jedoch ein, dass die aus anderen Systemen gemessenen Werte nicht völlig falsch seien. Er macht in seinen Betrachtungen keinen Unterschied zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schülerin 3 scheint zunächst das Relativitätsprinzip richtig anzuwenden:

1 *S3: Naja, ich glaube nicht, weil ... jedes Messgerät misst halt das was es quasi aufnimmt,*
2 *das ist ...*

Zitat 318

Bei Nachfrage, auf welchen Wert man sich einigen müsse, bezeichnet sie jedoch den Wert, der im Raumschiff, in dem sich die Bowlingbahn befindet, gemessen wird als richtig:

1 *S3: Na dann glaub ich, dass das Messgerät, das in dem Raumschiff mit der Bowlingbahn ist,*
2 *das richtige ist.*

Zitat 319

Bei der Argumentation zu dem Fall, dass sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet betrachtet sie den vom Gerät auf dem Raumschiff gemessenen Wert als fehlerhaft:

1 *S3: Ich glaub die ... das Messgerät auf der Erde ist richtig(.?)*
2 *B: Und weil?*
3 *S3: Ja weil das eben ... nicht durch die Geschwindigkeit verzerrt würde, also von dem her.*

Zitat 320

Dabei berücksichtigt sie nicht, dass die gleiche Argumentation auch bei der Betrachtung zweier Raumschiffe möglich gewesen wäre. Schülerin 3 wendet das Relativitätsprinzip zunächst scheinbar richtig an, es kann jedoch nicht tief verwurzelt sein, da sie meint, man müsse den Wert, der im System der Bowlingbahn gemessen wird, als richtig ansehen, wenn es zu einer Einigung kommen solle. Sie betrachtet die Situation anders, wenn sich die Bowlingbahn im erdfesten System befindet.

Schüler 4 scheint zunächst das Relativitätsprinzip richtig anzuwenden:

1 *S4: Beide haben Recht(.?)*

Zitat 321

Allerdings erklärt er seine Antwort schließlich damit, dass eines der Ergebnisse in der klassischen und das andere in der Quantenphysik richtig wäre:

1 *S4: Weil ... wir haben auch schon in Physik klassische und Quantenphysik, vielleicht is ...*
2 *das eine in der klassischen richtig und das andere in der Quantenphysik?*

Zitat 322

Dies ist keine logische Begründung für seine Aussage. Er ist weiters überzeugt davon, dass sich die Beobachter in verschiedenen Raumschiffen nicht bezüglich der Länge der Bowlingbahn einigen können:

- 1 *B: Ok, ok. Und ... wenn sie jetzt miteinander kommunizieren müssten über das E-, über die*
2 *Länge der Bowlingbahn ... könnten sie sich da irgendwie einigen, oder ... ?*
3 *S4: Nein.*

Zitat 323

Er betrachtet die Situation, in der sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet, genau gleich:

- 1 *S4: Ich hätt‘ gesagt wieder haben beide recht, heißt das is ... so ziemlich das Gleiche wie bei*
2 *den Raumschiffen.*

Zitat 324

Schüler 4 akzeptiert verschiedene Ergebnisse für verschiedene Beobachter, jedoch nicht aufgrund des Relativitätsprinzips, sondern aufgrund eines falschen Verständnisses der Unterschiede zwischen klassischer und Quantenphysik. Er betrachtet die Situation gleich, unabhängig davon, ob es sich um ein Raumschiff, oder um das erdfeste System handelt.

Schüler 5 meint zwar, man könne nicht sagen, welcher Messwert richtig sei, ist aber überzeugt, dass es einen richtigen gibt und meint, dass es sich um den handle, der vom Gerät erfasst wird, der sich im gleichen Raumschiff wie die Bowlingbahn befindet:

- 1 *S5: Mmmh ... also ich mein das is, is dann wahrscheinlich so, dass man’s nicht sagen kann*
2 *welcher richtig, oder welcher falsch is.*
3 *B: Mhm. Und würdest du aber sagen, dass es prinzipiell einen richtigen gäbe?*
4 *S5: Ähm ja.*
5 *B: Und welcher wäre das deiner Meinung nach?*
6 *S5: Also ich würd sagen der ... der Wert von dem wo sich die Bowlingbahn befindet, also*
7 *vom selben Raumschiff.*

Zitat 325

Ebenso meint er, dass der Wert, den das Messgerät auf der Erde für die Länge der Bowlingbahn auf der Erde anzeigen würde, richtig sei:

- 1 *S5: ... ähm ... ich mein rein logisch würd ich sagen ja ...*
2 *B: Ok.*
3 *S5: ... weil, ähm, ... das Messgerät wo sich, also auf der Erde, wo sich ja die Bowlingbahn*
4 *auch befindet, ... wär ja rein logisch gesehen müsste ja die, den genaueren Wert, oder*
5 *den richtigen Wert mehr, oder weniger haben.*

Zitat 326

Schüler 5 sieht den Wert, der im System der Bowlingbahn gemessen wird, als richtig an. Er unterscheidet dabei nicht zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schülerin 6 bezeichnet den Wert, der vom Gerät, das sich im gleichen Raumschiff wie die Bowlingbahn befindet, gemessen wird als wahrscheinlicher richtig:

1 *S6: ... ich hätte schon eher gesagt, dass es wahrscheinlicher ist, dass das ... wo die Bahn*
2 *drinnen is, dass do-, wo dort gemessen wurde, dass das richtig ist.*

Zitat 327

Sie bleibt ihrer Argumentation auch in dem Fall, dass sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet, treu:

1 *S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, wenn ich's vorher gesagt hab muss ich's jetzt*
2 *auch sagen, also. (lacht)*
3 *B: Du musst da gar nichts, das is ... dir freigestellt was du sagst in diesem Interview.*
4 *S6: (lacht) ... ja dann sag ich wieder, dass der Wert (des Messgeräts auf der Erde; Anm.)*
5 *richtig is.*

Zitat 328

Schülerin 6 betrachtet eher den Wert, der im System der Bowlingbahn gemessen wird, als richtig. Dabei unterscheidet sie nicht zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schülerin 7 spricht von einer absoluten und einer relativen Betrachtung und meint, dass der im relativ zur Bowlingbahn bewegten Raumschiff gemessene Wert zwar absolut, aber nicht relativ falsch sei:

1 *S7: Absolut gesehen wahrscheinlich gibt's einen falschen Wert, der von Rakete B, aber relativ*
2 *gesehen dann wahrscheinlich nicht.*
3 *B: Ok, was meinst du mit „relativ gesehen“?*
4 *S7: Naja, weil, der von B ist ja nicht falsch, der misst ja trotzdem eine Länge.*
5 *B: Ok.*
6 *S7: Aber ... es ist nicht exakt die Länge die wirklich ... vorhanden ist.*

Zitat 329

Auch wenn sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet, betrachtet sie beide Werte als richtig, jedoch nur den im System der Bowlingbahn gemessenen als exakt:

1 *S7: Ich würde wieder sagen, dass beide richtig sind, nur der ... auf der Erde ist halt der*
2 *exakte Wert.*
3 *B: Ok.*
4 *S7: ... Weil, es gibt sicher irgendwelche Faktoren die bei der Rakete da jetzt, ... oder bei*
5 *dem Raumschiff mitspielen ... die das Ergebnis dann trotzdem richtig ... sein lassen.*

Zitat 330

Schülerin 7 betrachtet den im System der Bowlingbahn gemessenen Wert als richtig, formuliert dies jedoch nur über das Wort „exakt“. Dabei unterscheidet sie nicht zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schülerin 8 meint, dass aufgrund der ungünstigeren Bedingungen für die Messung der Wert, der vom relativ zur Bowlingbahn bewegten Messgerät angezeigt wird, fehlerbehaftet sei:

- 1 S8: Würde ich schon sagen, weil das eben ... hier ist eigentlich ..., Entschuldigung, kei-
 2 ne ... Fehlerquelle im Sinne vom ... Gerät selbst schon, aber vielleicht nicht von den
 3 umständigen ... also um, um ... außenrum Situationen. Wie genau sagt man das?
 4 B: Von den Umständen einfach, ...

Zitat 331

Sie ist auch in dem Fall, dass sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet, davon überzeugt, dass nicht beide Werte korrekt sein können und räumt ein, dass beide falsch sein könnten. Dennoch betrachtet sie weiterhin den im System der Bowlingbahn gemessenen Wert als richtig:

- 1 S8: ... Es kann nicht beides richtig sein, weil ... eines von ... ich mein, stimmt es können
 2 auch beide nicht stimmen ... aber ...
 3 B: Inwiefern, ja?
 4 S8: ... naja, wenn sich beide vermessen und man legt ein Maßband daneben und da kommt
 5 heraus es ist, keine Ahnung, 19 m.
 6 B: Ach so, ok.
 7 S8: Ah, ich glaube weiterhin, dass das das ... stillstehende, ... nähere ... Messgerät ...
 8 oder ... auch auf der Erde befindende ... stimmen wird.

Zitat 332

Schülerin 8 betrachtet den im System der Bowlingbahn gemessenen Wert als richtig. Sie unterscheidet dabei nicht zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schüler 9 betrachtet den Wert, den das Gerät auf dem Raumschiff, auf dem sich die Bowlingbahn befindet, als richtig:

- 1 S9: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Also rein nach dieser Logik, ja.
 2 B: Und welcher wäre dann der richtige?
 3 S9: Der richtige wäre der der von dem, äh ... Messgerät, dass an Bord ist.

Zitat 333

Er meint auch, dass jedenfalls der Wert auf der Erde richtig sei:

- 1 S9: Definitiv, der Wert auf der rich-, also wenn ... wenn's ein richtig und falsch gibt, dann
 2 auf jeden Fall der auf der Wer-, Erde ist richtig, ... ähm, weil, als richtig sehen wir ja
 3 nur das an was für uns relevant ist und was für uns relevant ist ist auf der Erde und
 4 nicht im Raumschiff ...
 5 B: Ja, da könnte die Crew vom Raumschiff anderer Meinung sein. (lacht)
 6 S9: Ja eh, aber da-, also, ... wir geh-, also ... der, das Messgerät, äh, vom Raumschiff ist
 7 ja kalibriert auf die Einstellungen, die wir auf der Erde hatten, demnach gehen wir, die
 8 Einstellungen von der Erde sind praktisch unser Grundwert. Deshalb muss, wenn's ein
 9 richtiges gibt, das untere das richtige sein.

Zitat 334

Schüler 9 ist überzeugt davon, dass der im System der Bowlingbahn gemessene Wert richtig ist. Er unterscheidet dabei nicht zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schülerin 10 meint zunächst, dass beide Messgeräte einen richtigen Wert anzeigen würden, im Gesprächsverlauf wird jedoch klar, dass sie von einem Fehler beim relativ zur Bowlingbahn bewegten Messgerät ausgeht:

1 *S10: Ich glaube, ähm ... beide können Recht haben, ich glaube nicht, dass irgendwas davon*
2 *... nicht stimmt.*
3 *B: Mhm. Das heißt wir hätten wir hätten zwei verschiedene Längen für die Bowlingbahn und*
4 *du würdest sagen trotzdem stimmen beide Ergebnisse.*
5 *S10: Ich glaube schon, weil die nicht ... quasi nebeneinander stehen, also die Messgeräte ...*
6 *B: Mhm.*
7 *S10: Wenn schon, also ... wenn beide sich auf Raumschiff A befinden würden, ähm ...,*
8 *oder ... halt an beiden Enden dieser Bowlingbahn, dann hätte ich schon gesagt, dass sie*
9 *gleich ... sein sollten, aber sie befinden sich auf zwei ... verschiedene ... Körper, oder*
10 *in zwei verschiedenen Raumschiffen und ... die bewegen sich auch unterschiedlich, also*
11 *deswegen würde ich sagen ... es kann halt nicht perfekt sein, auch wenn die Messungen*
12 *perfekt eingestellt sind.*
13 *B: Mhm, also es ist dann trotzdem ... eigentlich ein Fehler?*
14 *S10: Ähm ... also ich glaube ... schon, dass es ... ein Fehler ist, aber ich würde nicht sagen,*
15 *dass es, ähm ... unbedingt falsch ist.*
16 *B: Ok. Und was würdest du sagen wäre dann die tatsächliche Länge der Bowlingbahn? Was*
17 *dieses Gerät in A misst, oder was dieses Gerät in B misst?*
18 *S10: Wahrscheinlich, ich, also ich würde ... sagen A stimmt, weil es viel näher ist und kann*
19 *diese Bowlingbahn genauer betrachten, unter Anführungszeichen, ähm ... und B hat,*
20 *ähm ... viel ... schlimmere Umstände, sage ich jetzt mal so, oder nicht genauer ...*
21 *ähm, Angaben und ja.*

Zitat 335

Ebenso meint sie, dass das Gerät auf dem Raumschiff einen weniger genauen Wert als jenes auf der Erde bestimme würde:

1 *B: Mhm. Also du würdest sagen das Gerät auf der Erde misst die tatsächliche Länge und das*
2 *hier (auf dem Raumschiff; Anm.) ... würde ...*
3 *S10: Einen nicht so genauen Wert.*

Zitat 336

Schülerin 10 betrachtet den im System der Bowlingbahn gemessenen Wert als richtig, formuliert dies jedoch nur als „genauer“. Sie macht dabei keinen Unterschied zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schüler 11 sieht keinen der Werte als falsch an:

1 *S11: Falsch ... äh, nein, nicht wirklich ...*
2 *B: Also ... du findest das an sich ... in Ordnung, dass es einfach zwei verschiedene Längen*
3 *für die Bowlingbahn gibt.*
4 *S11: Ja.*

Zitat 337

Bei Nachfrage meint er auch, dass man die tatsächliche Länge der Bowlingbahn nicht wissen könne:

1 *S11: ... Das kann man nicht wissen, was es ...*

Zitat 338

Es könnte sein, dass diese Ansicht in einer Verinnerlichung der Tatsache, dass reale Messungen nie exakt sein können begründet ist. Diese könnte durch den Laborunterricht begünstigt sein. Seiner bisherigen Argumentation folgt er konsequent und merkt an, dass es im Alltag irrelevant sei:

- 1 *S11: Hm ... naja, ... also wie gesagt, ich glaube, ich wieder, beide haben Recht, aber das ist*
 2 *für uns im Alltag, glaube ich irrelevant einfach, also ...*
 3 *B: Mhm.*
 4 *S11: Ist ja auch egal wie es ist.*

Zitat 339

Es ist dabei nicht klar, ob er bereits erkannt hat, dass die genannten Effekte bei alltäglichen Geschwindigkeiten kaum messbar sind, oder er sie einfach als bedeutungslos für sein Leben betrachtet. Auch bei der Betrachtung der Bowlingbahn auf der Erde hält er an seiner Überzeugung fest:

- 1 *B: Ok. Und würdest du hier sagen, dass es einen richtigen und einen falschen Wert gibt?*
 2 *S11: Nein. Aber ich glaube wir nehmen den an, Wert an der Erde für richtig an, weil ... das*
 3 *ist was uns interessiert, im Raumschiff ist für uns jetzt egal, oder(?.?)*

Zitat 340

Dabei betont er jedoch, dass für einen Betrachter auf der Erde der im Raumschiff gemessene Wert nicht wichtig sei⁴³. Schüler 11 betrachtet die Messwerte als gleichberechtigt, wobei nicht klar ist, ob er das auf Grundlage des Relativitätsprinzips, oder aus anderen Gründen tut. Er unterscheidet hierbei nicht zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schülerin 12 meint zunächst, dass beide Messwerte aus dem jeweiligen Raumschiff heraus betrachtet richtig seien:

- 1 *S12: ... Hm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... es ist schwer zu sagen, weil für die Messung*
 2 *von B ist natürlich ... die Messung von dem B-Gerät richtig und für A ist natürlich A*
 3 *richtig, aber das geht ... je nachdem, wie lang die Bahn halt selbst ist ... von, von der*
 4 *Sichtweise, von B ist ... die Bahn halt so lang und von der Sichtweise von A ist die*
 5 *Bahn halt 13,8 ... m lang.*

Zitat 341

Dabei geht sie aber offenbar davon aus, dass es einen tatsächlichen Wert gibt, und die Beziehungen der von den Geräten in den Raumschiffen gemessenen Werte zu diesem bleiben unklar. Auf die Nachfrage, ob es einen tatsächlichen Wert gäbe entgegnet sie, dass es zwei Sichtweisen gebe und die Länge der Bowlingbahn somit diskutierbar wäre:

- 1 *S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... ich würde sagen, dass der richtige Wert 13,8*
 2 *ist, aber es ist ... ich glaube es ist diskutierbar, weil ... es einfach ... zwei Sichtwei-*
 3 *sen gibt und zwei Messgeräte auf zwei verschiedenen Gerä-, äh, auf zwei verschiedenen*
 4 *Fahrzeugen, ja.*

Zitat 342

⁴³Für die Funktion des GPS gilt dieses Argument jedoch nicht.

Somit wendet sie das Relativitätsprinzip inhaltlich korrekt an, ohne es jedoch explizit zu erwähnen. Auch in dem Fall, dass sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet, bleibt sie bei dieser Ansicht und verneint die Frage danach, ob es einen richtigen und einen falschen Wert gibt:

- 1 *S12: ... Hm, nein.*
- 2 *B: Also würdest du wieder sagen das wäre diskutierbar?*
- 3 *S12: Mhm.*

Zitat 343

Schülerin 12 wendet das Relativitätsprinzip inhaltlich korrekt an, wobei unklar ist, ob sie dies bewusst tut, oder nicht. Dabei unterscheidet sie nicht zwischen einem Raumschiff und dem erdfesten System.

Schülerin 13 meint, dass die Länge der Bowlingbahn vom Betrachter abhängt:

- 1 *S13: Naja, es kommt auf den Betrachter an, wenn du hier bist, dann ist ... also, wenn du*
- 2 *in Raumschiff A bist, dann ist der Messwert für dich richtig und ... eben gleich für ...*
- 3 *den Betrachter von Raumschiff B.*
- 4 *B: Mhm.*
- 5 *S13: Würde sein.*
- 6 *B: Und gäbe es quasi absolut betrachtet einen ... richtigen Wert, oder ... kommt es ...*
- 7 *immer auf den Betrachter an?*
- 8 *S13: ... Ich glaube es kommt immer auf den Betrachter an.*

Zitat 344

Somit wendet sie in der gegebenen Situation das Relativitätsprinzip korrekt an, ohne es explizit zu nennen. Befindet sich die Bowlingbahn auf der Erde, so erachtet sie jedoch nur den auf der Erde gemessenen Wert als richtig:

- 1 *S13: ... Ähm ... jetzt würde ich sagen, dass der (Wert des Messgeräts auf der Erde; Anm.),*
- 2 *also die tatsächliche Länge der Bowlingbahn richtig wäre.*
- 3 *B: Ok.*
- 4 *S13: Also, wenn man's so misst wie, wenn man steht.*

Zitat 345

Schülerin 13 wendet das Relativitätsprinzip zunächst richtig an, wobei nicht klar ist, ob sie dies bewusst tut. Befindet sich die Bowlingbahn auf der Erde, so wendet sie das Relativitätsprinzip nicht mehr an und betrachtet nur den im erdfesten System bestimmten Wert als richtig.

6.4.2. Zusammenfassung

Alle 13 befragten Schüler sehen die Länge als eine absolute Eigenschaft eines Körpers an. Drei der Schüler drücken dies sogar sehr deutlich aus. Dabei wird die Länge offenbar nicht als eine durch die Messung festgelegte Größe betrachtet. Drei Schüler betrachten das Ergebnis der Längenkontraktion als Fehler, 10 Schüler wenden sie bei der letzten Aufgabe bereits richtig an, zwei wenden sie falsch an. Ein Schüler ist offenbar dazu bereit, die Länge

als relative Größe anzusehen. Diese Bereitschaft basiert vermutlich darauf, dass er bereits gelesen hat, dass die Zeit relativ ist.

Von den 13 befragten Schülern suchen 8 sofort nach einer Erklärung für die Längenkontraktion, und eine fordert explizit eine Erläuterung. Sieben Schüler argumentieren, dass sie die Folge eines Messfehlers sei. Zwei Schüler sind einfach nur überrascht und finden, dass die Längenkontraktion keinen Sinn ergebe oder komisch sei. Fünf Schüler signalisieren Bereitschaft, die Längenkontraktion als tatsächlichen Effekt anzuerkennen.

Drei der Schüler betrachten die Messwerte beider Systeme als gleichwertig, wobei nicht klar ist, ob sie ihre Aussagen bewusst auf das Relativitätsprinzip aufbauen. Zwei Schüler scheinen das Relativitätsprinzip zunächst richtig anzuwenden, erklären jedoch auf Nachfrage, dass es einen objektiv richtigen Wert gebe. Ein Schüler meint zu Beginn, dass nicht gesagt werden könne, welcher Wert richtig sei, ist aber von der Existenz eines richtigen Werts überzeugt. Ein Schüler sieht die Werte aufgrund falscher Vorstellungen zum Unterschied zwischen klassischer und Quantenphysik als gleichberechtigt an. Zwei Schüler zeigen Hinweise darauf, dass sie das erdfeste System eher als absolut betrachten als ein Raumschiff, bei einer davon ist diese Vorstellung deutlich.

6.5. Folgerungen

Rund die Hälfte der befragten Schüler lässt Vorstellungen von absoluter Bewegung und Ruhe bzw. eines absoluten Bezugssystems erkennen. Es sollte deshalb im Unterricht (schon bei der klassischen Mechanik) großer Wert darauf gelegt werden, diesen Vorstellungen mit geeigneten Situationen zu begegnen, in denen die Unmöglichkeit, ein solches absolutes Bezugssystem zu finden, deutlich wird. Auch sollte darauf aufbauend die Aussichtslosigkeit, die Begriffe der Ruhe und Bewegung absolut zu definieren, behandelt werden. Spätestens vor der Behandlung der speziellen Relativitätstheorie ist dies unabdingbar.

Die meisten der befragten Schüler haben bei der Betrachtung zweier Raumschiffe im Weltall, die sich relativ zueinander bewegen zwar zunächst eine adäquate Vorstellung des Relativitätsprinzips, können dieses jedoch oft nicht mehr korrekt anwenden, wenn die Längenkontraktion als Effekt besprochen wird. In dieser Situation betrachten die meisten Schüler die im Ruhesystem eines Körpers gemessene Länge als korrekt. Die Ergebnisse zeigen jedoch nicht eindeutig, dass das Relativitätsprinzip nicht richtig angewendet wird, da die meisten Schüler die in einem anderen System erhaltenen Werte als fehlerbehaftet sehen. Da es bei den meisten nicht gelang, zu vermitteln, dass die Messgeräte auch in diesem Kontext perfekt messen, stellen die Befunde nur einen Hinweis auf die inkorrekte Anwendung des Relativitätsprinzips dar. Jedenfalls betrachten viele der befragten Schüler die Längenkontraktion somit als scheinbaren Effekt. Im Unterricht sollte jedenfalls Wert darauf gelegt werden, zu vermitteln, dass die Längenkontraktion nicht aufgrund von Messfehlern zustande kommt. Außerdem ist es bedeutsam, das Relativitätsprinzip immer wieder auch bei der Besprechung der relativistischen Effekte einzubeziehen.

Der Großteil der Schüler löst Aufgaben zur klassischen Geschwindigkeitsaddition korrekt, und alle wenden diese auch auf Licht an. Dabei bereitet insbesondere der Fall, dass sich ein Lichtsignal und das Messgerät in die gleiche Richtung bewegen, vielen Schülern Probleme. Dieser Fall sollte bereits im Rahmen der klassischen Physik eingehend behandelt werden, um eine gute Grundlage für den Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie zu schaffen.

Die meisten der interviewten Schüler sind von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht, sodass sie einen brauchbaren Einstieg in den Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie bieten könnte. Dabei ist jedoch anzumerken, dass keine Aussage über den Fall getroffen werden kann, dass die klassische Geschwindigkeitsaddition zuvor nicht besprochen wird. Es wäre durchaus denkbar, dass Schüler ohne eine solche Besprechung die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit einfacher hinnehmen und diese Tatsache bei ihnen keine Neugier weckt. Die Schüler, die von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht überrascht sind, scheinen den Bruch zur klassischen Physik Großteils nicht zu erkennen. Unter diesen Voraussetzungen wird es kaum möglich sein, einen kognitiven Konflikt hervorzurufen.

Effekte der Lichtlaufzeit müssen thematisiert werden, da sie von einigen Schülern selbst angesprochen werden, und auch eine korrekte Vorstellung vom relativistischen Beobachten und einem Inertialsystem ohne deren Berücksichtigung wahrscheinlich nicht aufgebaut werden kann. Dies kann jedoch schon im Rahmen der klassischen Physik erfolgen und bei der speziellen Relativitätstheorie wieder aufgegriffen werden.

Aufgrund der Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die meisten Schüler vor dem Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff haben. Fast die Hälfte der Schüler erklärt die Relativität der Gleichzeitigkeit trotz idealer Messgeräte mit Messfehlern. Es ist davon auszugehen, dass dieser Vorstellung durch eine qualitative Herleitung aus den Grundprinzipien der speziellen Relativitätstheorie begegnet werden kann.

Da die meisten Schüler die Relativität der Gleichzeitigkeit überraschend finden, könnte sie einen motivierenden Beginn für den Unterricht darstellen.

Es ist aufgrund der Ergebnisse davon auszugehen, dass die meisten Schüler vor dem Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie eine tief verankerte Vorstellung von absoluten Längen haben.

Da die meisten der befragten Schüler von der Längenkontraktion überrascht sind und mehr als die Hälfte sofort eine Erklärung sucht, ist davon auszugehen, dass dieser Effekt einen motivierenden Einstieg für den Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie darstellen kann.

Gerade bei der Längenkontraktion sollte besonders darauf geachtet werden, zu vermitteln, dass es sich nicht um einen scheinbaren Effekt handelt, da die Schüler offenbar oft davon ausgehen.

Vor dem Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie lassen sich kaum Hinweise darauf finden, dass die Schüler das erdfeste System anders betrachten als ein anderes Inertialsystem. Es könnte daran liegen, dass sie die Längenkontraktion in beiden Fällen als scheinbaren Effekt betrachten.

7. Ergebnisse der 2. Interviewrunde

Im Folgenden ist die Auswertung der zweiten Interviewrunde ersichtlich. Die Darstellung ist nach den Themenbereichen Relativitätsprinzip, Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, Gleichzeitigkeit und Relativität von Raum und Längen geordnet. In den einzelnen Abschnitten wird zunächst der jeweils entsprechende Teil des Interviewleitfadens besprochen. Anschließend erfolgt die Auswertung, wobei Zitate zum Untermauern der Interpretationen angegeben werden. Am Ende jedes Abschnitts gibt es eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Eine Übersicht über alle Ergebnisse findet sich am Ende des Kapitels.

7.1. Relativitätsprinzip

Die Fragen, die den Leitfaden für das Gespräch zum Relativitätsprinzip bildeten und die jeweils verfolgten Ziele finden sich in Abschnitt 6.1.

7.1.1. Auswertung der Interviews zum Relativitätsprinzip

7.1.1.1 Schülervorstellungen zum Relativitätsprinzip

Alle 13 befragten Schüler haben zumindest für die gegebene Situation eine angemessene Vorstellung des Relativitätsprinzips. Sechs der Schüler haben eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips.

Schülerin 1 meint, dass nicht festgestellt werden könne welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *S1: ... ähm ... nein, kann ich nicht wirklich feststellen, dass is eher so, die Illusion, wenn*
2 *wir uns bewegen, dass das so aussieht wie wenn sich das zweite auch bewegt.(?)*
3 *B: Mhm.*
4 *S1: Also, es könnte sein, dass sich beide bewegen, oder halt, dass sich nur eines bewegt.*

Zitat 346

Sie ist jedoch davon überzeugt, dass ein Beobachter außerhalb der beiden Raumschiffe entscheiden könnte welches sich bewegt:

- 1 *S1: ... also, von außen gesehen, wenn man ... außerhalb steht, dann sieht man welches sich*
2 *bewegt.*

Zitat 347

Schülerin 1 hat zwar für die gegebene Situation eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips, setzt aber ein ausgezeichnetes, äußeres Bezugssystem voraus.

Schüler 2 spricht die Wahl von Raumschiff B als ruhendes Bezugssystem an und meint, dass nicht festgestellt werden könne, welches der Raumschiffe sich bewegt:

1 *S2: ... äh, für mich, bewegt sich eben Raumschiff B ...*
 2 *B: Ja.*
 3 *S2: ... weil eben ... ich das ruhen-, mein Bezugssystem bin ...*
 4 *B: Mhm.*
 5 *S2: ... ich glaube ich hab kein, hab keine Möglichkeit festzustellen, wer sich bew-, wirklich*
 6 *... wirklich bewegt.*

Zitat 348

Er erkennt, dass auch ein Beobachter außerhalb ein Bezugssystem wählen müsste und deshalb nicht behaupten kann, dass sich eines der Raumschiffe absolut bewegt:

1 *S2: Ja, äh, er, er kann es nicht feststellen, ob er sich bewegt, oder das Raumschiff sich bewegt*
 2 *...*
 3 *B: Mhm.*
 4 *S2: ... aber er kann ... feststellen, ob sich ... beide jetzt, ... ob sich bewegt, ob sich jetzt*
 5 *eines ... im Bezugssystem zu ihm bewegt, oder ob sich er ganz bewegt, oder ...*
 6 *B: Mhm.*
 7 *S2: ... jetzt beide bew-, bewegen.*

Zitat 349

Schüler 2 hat sowohl für die gegebene Situation, als auch generell eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips.

Schülerin 3 behauptet zunächst, dass nur durch eine Messung gesagt werden könne, welches der Raumschiffe sich bewegt, korrigiert sich jedoch und formuliert das Relativitätsprinzip in eigenen Worten:

1 *S3: Ich glaub' man kann's halt messen, indem man ... halt eine Lichtuhr verwendet, weil*
 2 *anders kann man's glaub' ich nicht feststellen ...*
 3 *B: Mhm.*
 4 *S3: ..., weil, aus der Sicht von A kann sich B bewegen, aber aus der Sicht von B kann sich*
 5 *auch A bewegen.*
 6 *B: Mhm.*
 7 *S3: Das weiß man halt nicht, wenn man ... misst, bzw. ich glaub' wenn man misst ..., dann*
 8 *kann man's auch nicht wirklich wissen, weil ... jeder aus seiner Sicht recht hat.*

Zitat 350

Sie ist überzeugt davon, dass ein „ruhender“ Beobachter außerhalb der beiden Raumschiffe feststellen könnte welches sich bewegt:

1 *S3: ... hm, ich denk' schon, wenn's einen ruhenden Körper gibt, der von außen die Schiffe*
 2 *betrachtet und dann ... Zeit misst, ich glaub' dann geht das.*

Zitat 351

Schülerin 3 hat für die gegebene Situation eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips, geht jedoch von der Existenz eines ausgezeichneten, äußeren Bezugssystems aus.

Schüler 4 ist überzeugt davon, dass nicht festgestellt werden kann, welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *B: Du siehst, dass sich Raumschiff B, relativ zu dir bewegt. Kannst du irgendwie feststellen,*
 2 *ob sich wirklich B bewegt, oder vielleicht doch A, oder sogar beide?*
 3 *S4: Nein.*

Zitat 352

Zunächst meint er, dass ein Beobachter außerhalb entscheiden könne, da er sich in einem anderen Bezugssystem befinde. Er korrigiert sich jedoch und sagt, dass nur die Relativbewegung festgestellt werden könne und erkennt, dass es keine absolute Antwort auf die Frage danach, wer sich bewegt, gibt:

- 1 *S4: Ja. Weil ich in einem ... anderen, äh, Bezugssystem bin.*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S4: Und deswegen ..., ich wäre das ruhende System und kann dann sagen ... wer si-, obwohl*
 4 *nein! ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... also, zwischen denen kann ich die Bewegung*
 5 *sagen, ja, als Außenstehender.*
 6 *B: Mhm. Und könnte dann jemand von denen Einspruch erheben und sagen, nein, aus meiner*
 7 *Sicht bewegst dich aber du als Außenstehender?*
 8 *S4: Ja. Es würde für ihr Bezugssystem stimmen.*
 9 *B: Ok, also ... gäb's jetzt eine absolute Entscheidungsmöglichkeit?*
 10 *S4: Nein.*

Zitat 353

Schüler 4 hat eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips für die gegebene Situation. Insgesamt ist das Relativitätsprinzip nicht so tief verankert, dass er es intuitiv benutzt, jedoch tief genug um den Fehler in seiner eigenen Argumentation zu erkennen und zu korrigieren.

Schüler 5 meint, dass nicht festgestellt werden könne, welches der Raumschiffe sich bewegt, außer es gäbe ein äußeres Bezugssystem:

- 1 *S5: Äh, nein. Weil es kein weiteres Bezugssystem gibt, dass ... stehend ist, also außer ich*
 2 *geh davon aus, dass ich stehend bin, aber ... feststellen kann ich's nicht.*

Zitat 354

Seine Argumentation setzt er logisch fort, indem er behauptet, dass aus einem äußeren Bezugssystem entschieden werden könne welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *B: Mhm. Aber würdest du sagen prinzipiell wär's möglich, dass es ein feststehendes Bezugs-*
 2 *system gibt, von dem aus man das feststellen könnte?*
 3 *S5: Ähm ... rein theoretisch ja, für die zwei Objekte halt dann.*

Zitat 355

Dabei ist nicht klar, ob er dieses Bezugssystem als ausgezeichnet betrachtet, oder nur als Rahmen, in dem für die gegebene Situation eine Aussage gemacht werden kann, da er davon spricht, dass für diese beiden Raumschiffe festgestellt werden könne welches sich bewegt. Schüler 5 hat für die gegebene Situation eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips, geht jedoch von der Existenz eines ausgezeichneten, äußeren Bezugssystems aus.

Schülerin 6 meint, dass ohne anderen Anhaltspunkt nicht festgestellt werden könne welches der Raumschiffe sich bewegt:

1 *S6: ... wenn's keinen anderen Anhaltspunkt gibt nicht.*

Zitat 356

Zunächst denkt sie darüber nach, ob ein außenstehender Beobachter ein Urteil über die Situation fällen könnte und macht dies davon abhängig, ob dieser sich bewegt oder nicht (relativ wozu wird nicht formuliert). Schließlich meint sie jedoch, dass auch von einem äußeren Beobachter keine sichere Aussage getroffen werden könne:

1 S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, äh, wenn der draußen sozusagen ruhend is,
2 dann kann er schon sehen welches auch ruhend is und welches sich bewegt, aber, wenn
3 er draußen sich auch bewegt ...

4 B: Mhm.

5 S6: ... kann es ja sein, dass er sich mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt, wie das was er
6 sieht was ruhend is und deswegen bewegt sich das auch. (lacht)

7 *B: Ok. Ok. Und wenn der draußen ruhend is, ähm, könnte dann nicht einer von denen sagen*
8 *„nein der bewegt sich und ich ruhe“?*

9 S6: Ja. Es kommt drauf an, aus welcher Sicht man's sieht.

10 *B: Hm, also könnte man jetzt absolut sicher sagen einer bewegt sich, einer ... ruht, oder ...*

11 *S6: Nein, kann man nicht.*

Zitat 357

Schülerin 6 hat generell eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips, ihre Aussagen legen jedoch nahe, dass sie Bewegung für etwas Absolutes hält. Es ist nicht klar, ob sie aufgrund des Relativitätsprinzips, oder aufgrund von Problemen bei praktischen Messungen zu dem Schluss kommt, dass keine sichere Aussage über die Bewegung der Raumschiffe getroffen werden kann.

Schülerin 7 scheint zunächst von absoluten Bewegungen auszugehen, da sie danach fragt ob sich der Beobachter im ruhenden, oder im bewegten System befindet:

1 S7: Ähm ... wir betrachten, wir sind in Raumschiff A(.

2 *B: Mhm.*

3 S7: Sind wir im bewegten, oder im, rel-, äh, im ruhenden System?

Zitat 358

Schließlich formuliert sie jedoch anhand der gegebenen Situation das Relativitätsprinzip, wobei sie kurz verunsichert ist, ob ihre Erklärung zutreffend ist:

1 S7: Äh, wenn wir in Raumschiff A das ruhende System sind, wenn wir das jetzt annehmen

 $2 \quad \dots$

3 *B: Mhm.*

4 S7: ... bewegt sich Raumschiff B.

5 *B: Mhm.*

6 S7: Wenn wir annehmen, dass wir im bewegten System sind, ruht Raumschiff B.

7 B: Mhm.

Zitat 359

Schülerin 7 meint jedoch, dass aufgrund der Betrachtung des Hintergrunds entschieden werden könnte, welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *S7: Wenn wir die uns, die Umgebung anschauen und da is alles gleich, also da bewegt, man*
 2 *sieht ja, ob sich was bewegt, oder nicht, wenn das ... ruht, dann bewegen wir uns. Wenn*
 3 *sich das draußen bewegt, dann bewegt sich Raumschiff B und ... A ruht ... hab' ich das*
 4 *schon mal gesagt?*

Zitat 360

Offenbar betrachtet sie den Hintergrund als ausgezeichnetes Bezugssystem. Schülerin 7 hat für die gegebene Situation eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips, sie geht jedoch von der Existenz eines ausgezeichneten Bezugssystems aus.

Schülerin 8 meint, dass durch Messungen, die von Geräten in Raumschiff A durchgeführt werden, festgestellt werden könne, welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *S8: ... naja, also ... ich befinde mich auf A, ... äh, durch einen, ... müsste irgendein*
 2 *Bezugssystem herstellen ...*
 3 *B: Ok.*
 4 *S8: ... damit man kontrollieren kann, ob ... also, eben A sich bewegt, oder nur das was man*
 5 *außen sieht ...*
 6 *B: Mhm.*
 7 *S8: ... es könnte (unverständlich) als Näherung vielleicht ... oder vielleicht auch mithilfe*
 8 *einer Uhr ... beide ... hab' ich irgendwie Zugriff auf B? Also, ...*
 9 *B: Du befindest dich auf A, das is ...*
 10 *S8: ... oder ich hab' gar keinen ...*
 11 *B: ... hm, das Raumschiff A is das System, in dem du dich befindest. Kannst du das von*
 12 *dort irgendwie feststellen?*
 13 *S8: Hm, sicherlich, aber wahrscheinlich nur durch irgendwelche Mess- ... Messer in A selbst*
 14 *...*
 15 *B: Mhm. Die was messen würden?*
 16 *S8: Die Geschwindigkeit und eben ... wenn sich's bewegt, dann zeigt die was an und wenn*
 17 *nicht, dann nicht.*

Zitat 361

Bei ihrer Aussage geht sie offenbar von einer absoluten Bewegung aus, die gemessen werden könnte, sie meint dabei aber eine Bewegung relativ zu einem Bezugssystem, das sie nicht näher definiert. Schließlich sagt sie, dass die Frage von einem Beobachter, der sich außerhalb der Raumschiffe befindet, entschieden werden könne, außer es sei außer den Raumschiffen nichts zu sehen:

- 1 *S8: Naja, wenn man außen irgendeinen Anhaltspunkt hat ...*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S8: ... dann könnte man ... das schon beurteilen, aber wenn's außen rum einfach schwarz*
 4 *is, weil, Weltall, dann ... könnt's schwer werden.*

Zitat 362

Schülerin 8 hat eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips, was insbesondere in Zitat 362 klar wird. Allerdings setzt sie offenbar ein ausgezeichnetes, äußeres Bezugssystem voraus.

Schüler 9 meint, dass nicht festgestellt werden könne, welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *S9: Nein, ich hab' kein Bezugssystem. Ich ... kann nicht wissen, ... welches Raumschiff sich*
2 *bewegt, aus meiner Sicht aus ... bewegt sich B.*

Zitat 363

Weiters spricht er explizit an, dass es kein ausgezeichnetes Bezugssystem gibt und somit auch ein äußerer Beobachter nicht entscheiden könne, welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *S9: ... ähm, eine Sicht von Außerhalb könnte es nur entscheiden, wenn's ... keine Ahnung,*
2 *irgendwie im ... Ruhest-, ähm, ein ruhendes System, oder im Bezugssystem, ähm, ...*
3 *ein allgemeingültiges gäbe, demnach, also das gibt's nicht und demnach kann's auch von*
4 *außen nicht ... entschieden werden ..., äh, was sich jetzt an was vorbeibewegt, bewegt*
5 *... genau.*

Zitat 364

Schüler 9 hat eine sehr gute Vorstellung des Relativitätsprinzips.

Schülerin 10 meint, dass nicht festgestellt werden könne, welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *S10: Ähm, ich glaub' nicht, weil, da sich beide ... ähm, weiß ich, ob sich beide Körper*
2 *bewegen, oder nicht?*
3 *B: Du siehst nur, irgendwas passiert zwischen denen ja.*
4 *S10: Ok. Da ich auf A quasi drauf bin aber nicht, nicht gleichzeitig auf B, weil das natürlich*
5 *nicht sein kann, äh, kann ich nicht feststellen, ob es sich tatsächlich, äh, bewegt, oder ob*
6 *ich mich bewege, ich seh' nur, dass B, relativ zu A bewegt.*

Zitat 365

Sie ist überzeugt davon, dass ein Beobachter, der sich außerhalb der Raumschiffe befindet entscheiden könnte, welches der beiden sich bewegt:

- 1 *S10: Äh, von draußen würd' ich schon sagen, dass es ... äh, entscheidbar, oder feststellbar*
2 *wär', ähm, aber da wir uns auf A befinden und wir uns vielleicht auch bewegen, deswegen*
3 *nicht, also, weil ich ja ... jetzt auf A bin, aber von außen wahrscheinlich schon.*

Zitat 366

Schülerin 10 hat für die gegebene Situation eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips, geht jedoch offenbar von absoluter Bewegung und einem ausgezeichneten, äußeren Bezugssystem aus.

Schüler 11 meint, dass es auf die Sicht, also auf die Wahl des Bezugssystems, ankommt:

- 1 *S11: Nein, das kommt aus ... der Sicht an.*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S11: Raumschiff A kann auch annehmen, dass es sich nicht bewegt und für sich bewegt, oder*
 4 *umgekehrt.*

Zitat 367

Er nennt die Erde als Beispiel für einen Betrachter der sich außerhalb der Raumschiffe befindet und meint, dass auch ein solcher Beobachter nicht feststellen könne, welches der Raumschiffe sich bewegt:

- 1 *S11: Also, du meinst, wenn wir jetzt auf der Ort, ah, Erde sind, zum Beispiel, und die Erde*
 2 *sieht sich auch selbst als ruhend an und ... von außen ...*
 3 *B: Irgendeine Sicht von außerhalb der beiden Raumschiffe, wo man reinschauen könnte,*
 4 *könnte man sowas machen und dann feststellen wer sich bewegt und wer nicht?*
 5 *S11: Naja, es in welchem Relation das ... man is außerhalb. Wenn man ... im gleichen ...*
 6 *nein, eigentlich nicht, weil, man kann ja auch nicht sagen, wenn man außen steht, ...*
 7 *dass man ... sich nicht bewegt.*

Zitat 368

Dabei merkt er in einem Beispiel an, dass sich auch die Erde bewegt:

- 1 *S11: Weil, ich wusste, dass das, äh, jetzt schlimmer wird als, äh, das vorige Mal, aber halt,*
 2 *wenn ich jetzt auf der Erde bin ... (lacht) ... und, äh, sagen wir ... ich sehe, dass*
 3 *Raumschiff A sich nicht bewegt, aber Raumschiff B sich bewegt, kann ich ja trotzdem*
 4 *nicht annehmen, dass sich Raumschiff A ... wirklich nicht bewegt, weil, die Erde bewegt*
 5 *sich ja auch, es bewegt sich beides.*

Zitat 369

Schüler 11 hat generell eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips und sieht offenbar auch die Erde als willkürlich gewähltes Bezugssystem an. Die Vorstellung einer absoluten Bewegung kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, da er nur davon spricht, dass man nicht absolut sagen könne, dass man ruht.

Schülerin 12 meint, dass nicht sicher gesagt werden könne, welches der Raumschiffe ruht:

- 1 *S12: Ähm, ... da ich mich, wenn ich mich in einem ruhenden ... Zustand befinde und ich*
 2 *kann nicht ganz sicher sein, ob ich mich in Ruhe, oder ... sich der andere Körper bewegt.*

Zitat 370

Sie meint, dass ein Beobachter, der zu beiden Raumschiffen den gleichen Abstand hat, entscheiden könne, dass die Raumschiffe sich bewegen:

- 1 *S12: ... mmm, ja, ich denk' schon, wenn man im ... gleichen Abstand zu beiden ... Raum-*
 2 *schiffen ... steht, ... bzw. von oben runterschaut, dass man sehen kann ..., ob sie*
 3 *sich bewegen, oder nicht, aber vielleicht nicht, welches sich bewegt, wenn sie sich im ...*
 4 *Weltraum befinden.*
 5 *B: Mhm. Und der könnte aber auf jeden Fall feststellen, ob was ruht, oder nicht(?) ... so*
 6 *ein ... äußerer Beobachter.*

7 *S12: Mmm, ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... wenn sich der Beobachter ... im Ruhestand*
 8 *befindet denk' ich schon, ja.*

Zitat 371

Schülerin 12 hat für die gegebene Situation eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips, unterscheidet jedoch Bewegung und Ruhe in Bezug zu einem ausgezeichneten, äußeren Bezugssystem. Dabei wird deutlich, dass sie Bewegung und Ruhe als absolut definierte, grundverschiedene Zustände ansieht. Interessant ist, dass sie meint, dass für Raumschiffe im Weltall nicht festgestellt werden könne, welches sich bewegt, sondern nur, dass sich beide bewegen. Offenbar sieht sie das Fehlen sichtbarer Bezugspunkte als Ursache der Unmöglichkeit der Feststellung, welches der Raumschiffe sich bewegt an und versteht Bewegung nicht als generell nur in Bezug zu einem Punkt definierte Größe an.

Schülerin 13 meint, dass nicht festgestellt werden könne, welches der Raumschiffe sich bewegt und bringt die Wahl des Bezugssystems ins Spiel:

1 *S13: Also, wirklich feststellen kann ich's nicht, weil ich kein ... Bezugssystem habe ...*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S13: ... bzw. eine Umwelt, woran ich das festmachen könnte ...*
 4 *B: Mhm.*
 5 *S13: ... bzw., es kommt auch auf den ... Betrachter an, wo ich mich befinde ...*
 6 *B: Mhm.*
 7 *S13: ... was ich als ruhig, ruhendes und bewegtes System wahrnehm.*

Zitat 372

Sie meint, dass auch ein Beobachter, der sich außerhalb der beiden Raumschiffe befindet, ein Bezugssystem wählen müsste und somit keine absolute Aussage getroffen werden könne:

1 *S13: ... äh, ... nicht wirklich, weil, es könnte sich ja die Außenwelt, wo der Betrachter sich*
 2 *befindet auch selbst bewegen, oder ruhend sein, deswegen würd' ich sagen ... eher nicht.*
 3 *Aber wenn ich's halt ... aus dem Fixpunkt sehe kann ich halt sagen, ok, ich bin jetzt das*
 4 *ruhende System und ich betrachte die andern Systeme ...*
 5 *B: Mhm.*
 6 *S13: ... in Relation zu mir.*

Zitat 373

Sie geht schließlich noch ausführlicher darauf ein, was sie unter einem Fixpunkt versteht, wobei deutlich wird, dass sie einen gewählten Punkt und kein ausgezeichnetes System meint das zur Beschreibung eines physikalischen Vorgangs gewählt wird:

1 *S13: Aus meiner Perspektive aus gesehen.*
 2 *B: Ok.*
 3 *S13: Ja.*
 4 *B: Also, meinst du etwas, ... das du als fix ... wählst ...*
 5 *S13: Ja. Also, wenn ich jetzt, keine Ahnung, ... einen Text über das schreib', ok, ich seh das*
 6 *jetz alles aus meiner Perspektive heraus.*
 7 *B: Mhm.*
 8 *S13: Ja.*

9 *B: Ok, gut. Könnte jemand anderer sagen, dein Fixpunkt ... bewegt sich? ... und den quasi*
10 *anzweifeln?*
11 *S13: Könnte, ja. (lacht) ... aber, wenn ich, ... wenn ich mich als ruhendes System festlege,*
12 *sozusagen, dann nicht ...*
13 *B: Mhm.*
14 *S13: ... würd' ich, also der kann's natürlich anzweifeln, aber ...*
15 *B: Mhm.*
16 *S13: ... dann ... geht das Ganze physikalische Experiment ja davon aus, dass ich ruhend*
17 *bin.*

Zitat 374

Schülerin 13 hat generell eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips.

7.1.2. Zusammenfassung

Alle 13 befragten Schüler haben für die gegebene Situation zumindest eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips. Sechs der befragten Schüler haben insgesamt eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips und sehen ein Bezugssystem von Beobachtern außerhalb der Raumschiffe ebenfalls als willkürlich gewählt an. Sieben Schüler gehen von einem ausgezeichneten, äußeren Bezugssystem aus. Bei neun Schülern lassen sich Hinweise auf die Vorstellung von absoluter Bewegung und Ruhe finden, bei einem weiteren kann diese Vorstellung jedenfalls nicht ausgeschlossen werden.

7.2. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die Fragen, die den Leitfaden für das Gespräch zur Geschwindigkeitsaddition und zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bildeten und die jeweils verfolgten Ziele finden sich in Abschnitt 6.2.

7.2.1. Auswertung der Interviews zur Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

7.2.1.1 Schülervorstellungen zur Geschwindigkeitsaddition bei niedrigen Geschwindigkeiten

Zwölf der 13 Schüler können alle Aufgaben zur klassischen Geschwindigkeitsaddition zumindest mit Hilfe korrekt lösen. Es lassen sich bei einigen Schülern Hinweise auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung finden.

Schülerin 1 nennt, nach einer Klarstellung, dass es um die Geschwindigkeit des Passagiers geht die richtigen Messwerte die die beiden Geräte für die Geschwindigkeit des Passagiers anzeigen:

1 *S1: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ja gar keine, weil der bleibt immer ... gleich.*
2 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*
3 *S1: Diese Tausend, oder eine Million, was war's?*
4 *B: 100.000.*

5 *S1: Ja, 100.000.*

Zitat 375

Sie erkennt sofort den Wert, den das Gerät auf Raumschiff B für den gehenden Passagier anzeigt:

1 *S1: Ähm, ... die Geschwindigkeit, die der Passagier geht(.?)*

Zitat 376

Für den Messwert des Geräts auf Raumschiff A nennt sie zunächst die Relativgeschwindigkeit, wobei dies offenbar darauf beruht, dass sie meint, das Gerät könne nur die Geschwindigkeit des Raumschiffs messen:

1 *S1: Noch immer wie schnell das Raumschiff sich bewegt, diese ... hundert ... dreißigtau-*
2 *send(.?)*

3 *B: 100.000 waren's, genau.*

4 *S1: Ja, 100.000.*

5 *B: Und ... wie schnell der Passagier geht, hat das einen Einfluss darauf, was das Gerät*
6 *misst?*

7 *S1: Nein.*

8 *B: Weil?*

9 *S1: Ähm, weil's ja nur das Raumschiff misst und nicht was drinnen passiert.*

10 *B: Und wenn es ... so fokussiert is, dass es tatsächlich ... die Geschwindigkeit des einzelnen*
11 *Passagiers misst?*

12 *S1: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... dann wäre es ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ...*
13 *vielleicht (lacht) die Geschwindigkeit vom Raumschiff, plus die vom Passagier? O-, ...*
14 *ja. ... ja wahrscheinlich.*

Zitat 377

Schülerin 1 löst die Aufgaben zur klassischen Geschwindigkeitsaddition korrekt, hat aber zunächst Schwierigkeiten mit der Vorstellung, dass das Gerät auf Raumschiff A die Geschwindigkeit des Passagiers auf Raumschiff B messen kann.

Schüler 2 denkt zunächst, dass die Relativgeschwindigkeit als Messwert des Geräts auf Raumschiff B für den sitzenden Passagiers angezeigt würde:

1 *S2: Für den Passagier ... misst es ... die 100.000 km/s.*

Zitat 378

Nach einer Klarstellung, dass die Geräte die Relativgeschwindigkeit des Passagiers zu sich selbst bestimmen, sagt er die richtigen Messwerte für die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers voraus:

1 *S2: Ah so, dann misst er (das Gerät auf Raumschiff B; Anm.) gar keine Geschwindigkeit, ah*
2 *so, weil das ... Messgerät hat ja auch eine Geschwindigkeit so, also ja auch, bewegt ja*
3 *auch nochmals, ja.*

4 *B: Mhm. Und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier messen?*

5 *S2: ... ja das wird dann die 100.000 km/s messen.*

Zitat 379

Auch die Messwerte für die Geschwindigkeit des gehenden Passagiers sagt er korrekt voraus:

- 1 *S2: Die Geschwindigkeit mit der er geht, ohne der ... , äh, Raketengeschwindigkeit.*
2 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*
3 *S2: ... ähm, die Geschwindigkeit der Rakete plus ... seine Gehgeschwindigkeit.*

Zitat 380

Schüler 2 hat eine gute Vorstellung von Inertialsystemen und der klassischen Geschwindigkeitsaddition. Seine ursprüngliche Antwort auf die erste Frage könnte als Hinweis auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung gedeutet werden, seine Reaktion auf die Klarstellung dessen, was die Messgeräte bestimmen, legt aber eher ein Missverständnis nahe.

Schülerin 3 nennt zunächst die Relativgeschwindigkeit als Messwert des Geräts auf Raumschiff B für die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers:

- 1 *S3: Diese 100.000 ... Kilometer pro ... Stunde, oder wie viel war's?*
2 *B: Mhm.*
3 *S3: Ja.*

Zitat 381

Bei der Rückfrage, ob sich der Passagier von dem Messgerät auf Raumschiff B mit dieser Geschwindigkeit entferne, wird klar, dass sie ihre Antwort auf das Messgerät auf Raumschiff A bezogen hat:

- 1 *S3: Nein mit dem Messgerät, er entfernt sich glaub' ich (lacht) ... nein, ich glaub' er entfernt*
2 *sich mit der Geschwindigkeit von dem (Messgerät; Anm.) hier (auf Raumschiff A; Anm.).*
3 *B: (unverständlich) das heißt dieses Objekt, äh, dieses Messgerät auf Raumschiff A ... würde*
4 *was anzeigen für den Passagier?*
5 *S3: Diese Geschwindigkeit, von vorhin(.?)*

Zitat 382

Anschließend vermutet Schülerin 3 eine höhere Geschwindigkeit als Messwert des Geräts auf Raumschiff B, findet jedoch durch einige helfende Fragestellungen zur korrekten Antwort:

- 1 *S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht eine schnellere? Ich glaub' er (das Gerät*
2 *auf Raumschiff B; Anm.) ... würde drinnen eine schnellere Geschwindigkeit messen*
3 *(unverständlich).*
4 *B: Das heißt, der Passagier entfernt sich von diesem Messgerät auf Raumschiff B noch schneller,*
5 *als von dem auf Raumschiff A?*
6 *S3: Na, er (der Passagier; Anm.) bewegt sich gar nicht, weil, er sitzt da drin, aber ...*
7 *B: Das heißt, wie schnell entfernt er (der Passagier; Anm.) sich von dem Messgerät hier (auf*
8 *Raumschiff B; Anm.)?*
9 *S3: ... ja, gar nicht.*
10 *B: Gar nicht, ja, was zeigt dann das Gerät dann einfach an als Geschwindigkeit?*
11 *S3: Null.*

Zitat 383

Die Messwerte, die die Geräte für die Geschwindigkeit des gehenden Passagiers bestimmen, sagt sie sofort richtig vorher:

- 1 *S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... seine Geschwindigkeit mit der er zum ... zum vorenen,*
2 *vorderen Teil geht.*
3 *B: Und was würde das Gerät auf Raumschiff A für die Geschwindigkeit des Passagiers an-*
4 *zeigen?*
5 *S3: ... seine Geschwindigkeit und die Geschwindigkeit mit der sich das Raumschiff bewegt.*

Zitat 384

Schülerin 3 hat zunächst offenbar Probleme damit, zu erfassen, was das Messgerät, das sich im gleichen Raumschiff wie der Passagier befindet, bestimmt. Nach einer Klärung dieser Frage löst sie jedoch alle Aufgaben zur klassischen Geschwindigkeitsaddition korrekt.

Schüler 4 meint zunächst, dass das Gerät auf Raumschiff B die Relativgeschwindigkeit für den Passagier anzeige und das Gerät auf Raumschiff A einen höheren Wert:

- 1 *S4: Hundert, äh, Meter pro Sekunde.*
2 *B: Was würde das Gerät auf A für den Passagier messen?*
3 *S4: ... einen anderen Wert?*
4 *B: Es geht immer um die Frage, wie ... schnell bewegt sich der Passagier auf das Messgerät*
5 *zu, oder von dem Messgerät weg.*
6 *S4: Also, ein ... höheren Wert.*

Zitat 385

Dabei ist ihm offenbar nicht klar, was die Geräte messen, da er nach einer Klarstellung die richtigen Werte nennt:

- 1 *B: Schau dir die Situation einmal genau an. ... ähm, stell dir vor das is jetzt kein Messgerät,*
2 *sondern du bist es und du sitzt da auch.*
3 *S4: Mhm.*
4 *B: Wie schnell entfernt sich der (Passagier auf Raumschiff B; Anm.) dann von dir?*
5 *S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... der Passagier?*
6 *B: Mhm. Es geht immer um den Passagier.*
7 *S4: Mit ... Null.*
8 *B: Mhm. Was würde dann das Messgerät für ihn messen?*
9 *S4: Null.*
10 *B: Und was würde das Messgerät auf Raumschiff A für ihn messen?*
11 *S4: 100.000, so.*

Zitat 386

Auch die Messwerte, die die Geräte für die Geschwindigkeit des gehenden Passagiers messen, sagt er korrekt voraus:

- 1 *S4: So ... schnell wie er geht.*
2 *B: Und das auf Raumschiff A?*
3 *S4: Ähm, die ... 100.000 plus das, was er geht.*

Zitat 387

Schüler 4 wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition nach einer Klärung dessen, was gemessen wird, korrekt an. Die ursprüngliche Antwort könnte ein Hinweis auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung sein.

Schüler 5 sagt die Werte, die die Messgeräte für die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers anzeigen, korrekt voraus:

- 1 *S5: Ähm, dann würd's gar nichts anzeigen, weil sie ... dieselbe Geschwindigkeit haben, was*
2 *in dem Fall dann für das Messgerät 0 wär'.*
3 *B: Mhm, und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier anzeigen?*
4 *S5: Äh, die Geschwindigkeit für Raumschiff B.*

Zitat 388

Auch in dem Fall, dass der Passagier geht, nennt er die richtigen Messwerte für beide Messgeräte:

- 1 *S5: Ähm, die Geschwindigkeit der Person, also wie sie halt, wie schnell sie geht.*
2 *B: Ok. Und die ..., das Gerät auf Raumschiff A?*
3 *S5: Äh, würd' die ... Geschwindigkeit vom Raumschiff, plus die Geschwindigkeit von der*
4 *Person.*

Zitat 389

Schüler 5 hat eine gute Vorstellung der klassischen Geschwindigkeitsaddition.

Schülerin 6 nennt den richtigen Messwert für das Gerät auf Raumschiff B, falls der Passagier sitzt:

- 1 *S6: ... ähm, ... keine Geschwindigkeit, also Null.*

Zitat 390

Bei der Bestimmung des Messwerts, den das Gerät auf Raumschiff A anzeigt, hat sie zunächst Schwierigkeiten mit dem Begriff der Relativgeschwindigkeit, antwortet jedoch nach einer Klarstellung korrekt:

- 1 *S6: ... das zeigt eine Geschwindigkeit an, weil ... es bewegt sich ja ... also sie bewegen sich*
2 *ja gegeneinander vorbei ...*
3 *B: Mhm.*
4 *S6: ... und es sollte dann 200.000 ... km/s, weil das eine bewegt sich ja in die Richtung ...*
5 *mit 1.000, das andere in die andere Richtung mit 1.000.*
6 *B: Mhm, die Relativgeschwindigkeit von 100.000, die pa-, die fasst schon zusammen ...*
7 *S6: Ah so, ok, ok.*
8 *B: ... die gesamte Bewegung.*
9 *S6: Ja, dann sollte es (das Gerät auf Raumschiff A; Anm.) 100.000 ... anzeigen.*

Zitat 391

Im Fall des gehenden Passagiers sagt sie die Messwerte beider Geräte sofort richtig voraus:

- 1 *S6: Also die Schritt-, ... also die Geschwindigkeit vom Passagier, so wie schnell er geht.*
2 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*

3 *S6: ... hm, ja das sollte die ... halt die Geschwindigkeit, mit der sie sich relativ ..., äh,*
 4 *voneinander bewegen plus die Schrittgeschwindigkeit messen.*

Zitat 392

Schülerin 6 hat eine gute Vorstellung der klassischen Geschwindigkeitsaddition, jedoch Schwierigkeiten mit dem Begriff der Relativgeschwindigkeit.

Schülerin 7 nennt, nach einer Bestätigung, dass es um die Geschwindigkeit des Passagiers geht, die richtigen Messwerte, die beide Geräte für die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers anzeigen:

1 *S7: ... misst das Messgerät ... die Geschwindigkeit von A, oder die Geschwindigkeit von*
 2 *dem wo sich jetzt Raumschiff ...*
 3 *B: Das Gerät auf Raumschiff B misst jetzt nur, wie ... bewegt sich der Passagier relativ zum*
 4 *Messgerät.*
 5 *S7: Der Passagier bewegt sich gar nicht zum Messgerät, weil sich das in dem bewegten System*
 6 *nicht verändert, also die Geschwindigkeit verändert sich nicht.*
 7 *B: Ok. Und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für eine Geschwindigkeit für den*
 8 *Passagier messen?*
 9 *S7: ... die Geschwindigkeit von dem Raumschiff(.?)*

Zitat 393

Auch die Messwerte beider Geräte für den gehenden Passagier erkennt sie richtig:

1 *S7: Die Geschwindigkeit die der ... Mensch zurücklegt(.?)*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S7: Also, gemütlich.*
 4 *B: Ja. Und das Gerät auf Raumschiff A, was misst das für seine Geschwindigkeit?*
 5 *S7: ... die Geschwindigkeit von der Rakete plus die Geschwindigkeit von dem Menschen.*

Zitat 394

Schülerin 7 kann verständig mit der klassischen Geschwindigkeitsaddition umgehen.

Schülerin 8 nennt zunächst die Relativgeschwindigkeit als Messwert, korrigiert sich jedoch nach einem Hinweis, dass sich das Gerät und die Person im gleichen Raumschiff befinden und nennt auch den korrekten Messwert für das Gerät auf Raumschiff B:

1 *S8: ... 100.000 km/s, oder ...*
 2 *B: Die befinden sich im gleichen Raumschiff ... und das Gerät misst immer, ob sich der*
 3 *Passagier ...*
 4 *S8: Ach so!*
 5 *B: ... vom Gerät entfernt, oder ...*
 6 *S8: Ach so, ob sich der Passagier, na dann ... null ... m/s.*
 7 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A? ... was misst das ...*
 8 *S8: Misst ...*
 9 *B: ... für den Passagier?*
 10 *S8: ... für den Passagier ... 100.000 ... m/s.*

Zitat 395

Sie meint zunächst, das Gerät auf Raumschiff B messe für den gehenden Passagier die Summe aus der Relativgeschwindigkeit und der Gehgeschwindigkeit und nennt als Beispiel eine in einem Zug gehende Person. Nach einer Rückfrage, ob sich das auf die Geschwindigkeit vom Zug oder vom Bahnsteig aus gesehen beziehen müsste, korrigiert sie sich erneut:

- 1 *S8: Hm ... es misst eine Kombi aus ... eben der eigentlichen Bewegung vom... Menschen*
2 *...*
3 *B: Mhm.*
4 *S8: ... und der generellen Bewegung vom ... Raumschiff.*
5 *B: Die befinden sich wieder auf dem gleichen Raumschiff.*
6 *S8: Hm, ich glaub's irgendwie trotzdem, weil war's nicht irgendwie so, dass, wenn ... das ...*
7 *miteinander, also das irgendwie zusammenspielt? Weil, wenn man sich selbst bewegt, in*
8 *einem bewegenden ... Objekt, wie im Zug ...*
9 *B: Mhm.*
10 *S8: ..., dass man ... eigentlich schneller geht als man ... tatsächlich geht(.?)*
11 *B: Relativ zum Zug, oder relativ zu dem außerhalb des Zuges?*
12 *S8: ... relativ ... zum ... ach so, ... dann könnt's sein, dass es das für A gilt ...*
13 *B: Mhm.*
14 *S8: ... und, dass für B weiterhin nur das gilt was ... der ... Mensch halt wirklich sich*
15 *bewegt.*

Zitat 396

Schülerin 8 kann die klassische Geschwindigkeitsaddition verständig anwenden, hat jedoch Schwierigkeiten damit zu erkennen in Bezug zu welchem Messgerät welcher Fall eintritt. Ihrer ersten Antwort scheint jedoch eher ein Missverständnis zugrundezuliegen.

Schüler 9 nennt den korrekten Messwert des Geräts auf Raumschiff B für die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers, hat zunächst Probleme mit dem Begriff der Relativgeschwindigkeit bei der Betrachtung der Situation aus Raumschiff A, korrigiert sich jedoch selbst:

- 1 *S9: ... ähm, ... für den Passagier ..., ah, 0 km/h, weil er sich ja genau, also, beide ...*
2 *bewegen sich genau gleich schnell.*
3 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*
4 *S9: Das ... misst ... für den Passagier ... das ... Doppelte der Geschwindigkeit, das heißt*
5 *..., ja doch, genau, 200.000 Kilometer ... pro ... Sekunde, haben wir g'sagt, oder?*
6 *B: Und ... warum das Doppelte?*
7 *S9: Ähm, weil sich praktisch beide mit Hundert-, wir haben g'sagt, ah so, nein, 100.000, relativ*
8 *zueinander, haben wir gesagt, das heißt sie misst 100.000, genau. Weil sonst würd' sich's*
9 *addieren ... er misst 100.000 km/s.*

Zitat 397

Für den gehenden Passagier findet er sofort die richtigen Messwerte:

- 1 *S9: Ähm, die Geschwindigkeit mit der er zur Spitze geht, ähm, ...*
2 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*
3 *S9: 100.000 plus ... die Geschwindigkeit, mit der er zur Spitze geht.*
4 *B: Ok.*

5 *S9: Wart, oder ... er geht in die Ri-, entgegengesetzte ..., ja doch, genau, genau. Wenn er*
 6 *in die andere Richtung gehen würde, dann wär's Minus.*

Zitat 398

Die letzte Aussage von Schüler 9, bei der er sein Ergebnis kurz anzweifelt, dann jedoch bestätigt und sogar die Lösung für einen alternativen Fall nennt, zeigt, dass er die klassische Geschwindigkeitsaddition problemlos anwenden kann. Der Fehler bei der Betrachtung der Relativgeschwindigkeit basiert offenbar auf einem Missverständnis, da er sich erfolgreich korrigiert.

Schülerin 10 nennt zunächst die Relativgeschwindigkeit als Messwert des Geräts auf Raumschiff B für die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers:

1 *S10: Ähm, wahrscheinlich so viel wie, ... ähm ... wie das am Anfang gesagt wurde. 100.000*
 2 *...*
 3 *B: Mhm.*
 4 *S10: ... war das glaub' ich.*
 5 *B: Mhm.*
 6 *S10: Meter pro Sekunde. Ähm, da sich B auch so schnell bewegt und dieses Messgerät sich*
 7 *auf B befindet.*

Zitat 399

Nach einer Rückfrage, wie schnell sich der Passagier vom Messgerät entfernt, erfasst sie den Sachverhalt korrekt, hat jedoch Probleme damit, die Messwerte zu formulieren:

1 *B: Mhm, entfernt sich der Passagier von dem Messgerät, wenn er sitzt?*
 2 *S10: Nein, also das ...*
 3 *B: Und genau das misst aber das Gerät, ob er sich entfernt vom Gerät, oder nicht. Und was*
 4 *würde es dan anzeigen?*
 5 *S10: Mmm..., dass es sich nicht entfernt, weil es sich, weil es mit B weiter ... fährt, oder*
 6 *fliegt, quasi.*
 7 *B: Genau, die Geschwindigkeit wär' dann ...*
 8 *S10: Gleich, also halt ... ja.*
 9 *B: Ok. Und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für die Geschwindigkeit dieses*
 10 *Passagiers messen?*
 11 *S10: Ähm, ich glaub', ähm, da es ebenfalls auf B liegt und B bewegt sich relativ zu A, dann*
 12 *bewegt sich diese Person auch relativ zu A und dann würde dieses Gerät das messen, wie*
 13 *... schnell B und diese Person sich bewegen dann(.?)*

Zitat 400

Wenn der Passagier geht, erkennt sie nicht die Auswirkung der Tatsache, dass sich das Messgerät auf Raumschiff B und der Passagier in einem Inertialsystem befinden:

1 *S10: Ich glaub' grundsätzlich das wo-, womit halt B, hm, fährt, äh, plus diese Geschwindigkeit,*
 2 *was diese Person, sich annimmt.*
 3 *B: Aber das Gerät fährt ja selber mit.*
 4 *S10: Ja. ... ähm, ich würd' sie trotzdem addieren, also das 100.000 m/s und diese Geschwin-*
 5 *digkeit von dieser Person.*

Zitat 401

Für das Gerät auf Raumschiff A nennt sie den gleichen Messwert:

- 1 *S10: ... mmm ... also grundsätzlich, wie sich B relativ zu A, ähm, bewegt, und diese Person*
2 *noch zusätzlich.*
3 *B: Ok.*
4 *S10: Was dazugibt.*

Zitat 402

Schülerin 10 hat Schwierigkeiten damit, zu erfassen, was es bedeutet, dass sich ein Messgerät und die Person im gleichen Bezugssystem befinden. Dies könnte ein Hinweis auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung und damit einer vom Messgerät erfassten absoluten Geschwindigkeit sein. Die Geschwindigkeiten, die das Messgerät auf Raumschiff A misst, findet sie problemlos. Die Geschwindigkeitsaddition gelingt ihr somit korrekt.

Schüler 11 stellt zunächst viele Rückfragen, um sicherzustellen, dass er die Situation korrekt erfasst hat. Anschließend erkennt er den Zusammenhang zu im Unterricht besprochenen Themen und nennt die richtigen Messwerte für die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers:

- 1 *S11: Oh mein Gott, das is dasselbe mit dem Zug, das wir in der Schule gemacht haben. Ähm*
2 *... äh, also das Messgerät, wir wollen, nein wir wollen nicht die Länge abmessen, wir*
3 *wollen eh die Geschwindigkeit abmessen ...*
4 *B: Ja.*
5 *S11: ... äh, ich verwechsel wieder alles, (lacht) war ja eh klar. Also aus meiner Sicht würde*
6 *das Messgerät jetzt sagen, dass das Raumschiff B ...*
7 *B: Ja (unverständlich) der Passagier.*
8 *S11: Der Passagier bewegt sich aber, er sitzt ja einfach im Raumschiff B, oder?*
9 *B: Ja.*
10 *S11: dann is er ja wie ein Teil des Raumschiffs B ...*
11 *B: Genau.*
12 *S11: ... weil er nicht beschleunigt wird.*
13 *B: Und für so einen Teil würde das Gerät was anzeigen?*
14 *S11: Weil das Gerät befindet sich auf dem Raumschiff(?.)*
15 *B: Mhm.*
16 *S11: Ja dann 0 km/h.*
17 *B: Ok, und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier anzeigen?*
18 *S11: Sagen, wir nehmen jetzt an, dass Raumschiff A sich nicht bewegt ...*
19 *B: In dem Fall ...*
20 *S11: ... aus ..., aus dem Sicht des Raumschiff A bewegt sich Raumschiff B zu, mit 100.000*
21 *Kilometern daran vorbei.*
22 *B: Und der Passagier?*
23 *S11: Auch 100.000 Kilometer.*
24 *B: Mhm.*
25 *S11: Weil es ja sitzt.*

Zitat 403

Die Messwerte, die die Geräte für den gehenden Passagier erhalten, findet Schüler 11 sofort:

- 1 B: ... welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff B für den ... gehenden
 2 Passagier?
 3 S11: Keine 5 km/h.
 4 B: Mhm, und das Gerät auf Raumschiff A?
 5 S11: Äh, 105.000, also nein, 100.005, so.
 6 B: Ok.
 7 S11: Für den Passagier, oder für das Raumschiff?
 8 B: Für den Passagier ... ja.
 9 S11: Ja.

Zitat 404

Schüler 11 kann die klassische Geschwindigkeitsaddition verständig einsetzen und hat eine gute Vorstellung von der Bedeutung von Bezugssystemen, braucht jedoch viel Zeit, um die Situation zu erfassen.

Schülerin 12 erfasst die Situation sofort und nennt die richtigen Messwerte für die Geschwindigkeit des Passagiers:

- 1 S12: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... für den Paschassie-, Pa-, Pa-, (unverständlich),
 2 Passagier selbst ... keine Geschwindigkeit ...
 3 B: Mhm.
 4 S12: ..., ähm, ... da er sich selbst nicht bewegt, sondern sich das Raumschiff bewegt.
 5 B: Und ... das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier messen?
 6 S12: Ähm, ... die Geschwindigkeit von Raumschiff B(.)?

Zitat 405

Sie bestimmt die Messwerte beider Geräte für die Geschwindigkeit des gehenden Passagiers sofort korrekt:

- 1 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ..., äh, die Geschwindigkeit in der er sich vorbe-, ...
 2 fortbewegt(.?)
 3 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
 4 S12: Misst, ähm, ... die Geschwindigkeit vom Passagier plus die Geschwindigkeit von Raum-
 5 schiff B(.?)

Zitat 406

Schülerin 12 hat ein gutes Verständnis der klassischen Geschwindigkeitsaddition und der Bedeutung von Bezugssystemen für die Geschwindigkeitsmessung.

Schülerin 13 nennt sofort die richtigen Messwerte beider Geräte für die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers:

- 1 S13: ... also, wie viel, wie viel, wie schnell der Passagier is? Äh ... 0 km/h, weil er ...,
 2 weil sie im selben Bezugssystem sind.
 3 B: Und das Gerät auf Raumschiff A? Für den Passagier(.?)
 4 S13: ... bewegt sich das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.)?
 5 B: Naja, wir wissen nur, ... es gibt eine Relativbewegung ...
 6 S13: Ok.
 7 B: ... von 100.000 km/s.
 8 S13: Ja, dann misst ... das Messgerät auf Raumschiff A ... die Geschwindigkeit von Raum-
 9 schiff B, halt ... je nachdem wie es sich, relativ zu Raumschiff A bewegt ...

10 *B: Mit 100.000.*
 11 *S13: ... mit 100.000 km/s.*

Zitat 407

Sie nennt zunächst einen inkorrekten Messwert für die Geschwindigkeit des gehenden Passagiers aus der Sicht des Geräts auf Raumschiff A, es scheint sich jedoch um ein Missverständnis zu handeln. Anschließend fällt es ihr schwer, den korrekten Messwert zu formulieren:

1 *B: Ok. Jetzt steht der Passagier auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B. Welche*
 2 *Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?*
 3 *S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... so schnell wie er geht(.?)*
 4 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*
 5 *S13: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht ... 100.000 km/s, weil er sich in dem*
 6 *Bezugssystem B bewegt?*
 7 *B: ... das Gerät möchte aber tatsächlich nicht die, nur vom Bezugssystem nur ...*
 8 *S13: Ok.*
 9 *B: ... die Geschwindigkeit messen, sondern von der Person selbst.*
 10 *S13: ... dann ist die Geschwindigkeit, glaub' ich ... verzogen, sozusagen, weil sich halt Raum-*
 11 *schiff B mit 100.000 km/s bewegt und der Passagier dazu noch geht ...*
 12 *B: Mhm.*
 13 *S13: ... deswegen kann man die exakte Geschwindigkeit, sozusagen, nicht feststellen vom*
 14 *Passagier, bzw. halt nur die aus der Perspektive von Raumschiff A.*
 15 *B: Mhm, und welche wäre das aus der Perspektive von Raumschiff A?*
 16 *S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... eben (lacht), ich glaub' ... (4 Sekunden Pause;*
 17 *Anm.) ... die Gesch-, eben die Geschwindigkeit von Raumschiff B, halt ... irgendwie*
 18 *(lacht) ... ich weiß nicht wie ich das sagen soll, ähm ...*
 19 *B: Wür's größer als die Geschwindigkeit nur von Raumschiff B, oder kleiner?*
 20 *S13: Ja, größer würd' ich sagen, halt addiert dazu.*
 21 *B: Ok.*
 22 *S13: Ja.*
 23 *B: Und wie viel größer?*
 24 *S13: So viel wie halt der Passagier geht.*

Zitat 408

Schülerin 13 wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition verständig an, ihre Antworten deuten jedoch darauf hin, dass sie die von Raumschiff A aus gemessene Geschwindigkeit für den gehenden Passagier für nicht exakt hält. Sie unterscheidet offenbar zwischen der exakten Geschwindigkeit, die nur im Raumschiff B festgestellt werden kann, und anderen Geschwindigkeiten, sodass sie die Inertialsysteme nicht als gleichwertig betrachtet. Sie denkt möglicherweise auch daran, dass es messtechnisch nicht möglich wäre, die Geschwindigkeit des im Raumschiff gehenden Passagiers zu bestimmen.

7.2.1.2 Schülervorstellungen zur Geschwindigkeitsaddition bei der Lichtgeschwindigkeit

Fünf der 13 Schüler berücksichtigen das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht in allen Situationen in ihrer Argumentation. Vier davon wenden die klassische Geschwindigkeitsaddition auf das Licht an und tun dies im Sinne der klassischen Physik

korrekt.

Schülerin 1 hat zunächst erneut Probleme damit, zu erkennen, dass das Gerät auf Raumschiff A die Geschwindigkeit des Lichtes selbst misst. Nach einem Hinweis wendet sie die klassische Geschwindigkeitsaddition auf das Licht an:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?*
2 *S1: ... ja die Lichtgeschwindigkeit.*
3 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*
4 *S1: Wieder wie schnell sich ... das Raumschiff B bewegt.*
5 *B: Und wenn es wieder wirklich auf das Licht selber fokussiert?*
6 *S1: dann würd' ich wieder sagen, die Geschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit; Anm.) plus*
7 *die Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 409

Genauso argumentiert sie auch in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet, wendet dabei allerdings die klassische Geschwindigkeitsaddition falsch an:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?*
2 *S1: ... die Lichtgeschwindigkeit(.?)*
3 *B: Und das Gerät auf Raumschiff B?*
4 *S1: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... wie schnell Raumsch-, äh, die Geschwindigkeit von*
5 *Raumschiff A(.?)*
6 *B: Und wieder, wenn es ... eigentlich das ... Licht fokussiert?*
7 *S1: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... wieder die Geschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit;*
8 *Anm.) plus ... die Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 410

Schülerin 1 bezieht das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht in ihre Überlegungen mit ein. Die klassische Geschwindigkeitsaddition wendet sie nicht in allen Fällen korrekt an⁴⁴.

Schüler 2 meint, dass beide Messgeräte für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht die gleiche Geschwindigkeit messen:

- 1 *B: Die Lichtgeschwindigkeit beträgt 300.000 km/s ... ungefähr. Welche Geschwindigkeit*
2 *misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?*
3 *S2: ... die Lichtgeschwindigkeit.*
4 *B: Und das auf Raumschiff A, was misst das für das Licht?*
5 *S2: Müsste auch die Lichtgeschwindigkeit sein.*

Zitat 411

Die gleiche Vorhersage trifft er in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet:

- 1 *B: Und was, wenn wir die Lampe auf Raumschiff A aufstellen und sie leuchtet in Richtung*
2 *Heck auf Raumschiff A? Was misst dann das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?*
3 *S2: Auch die Lichtgeschwindigkeit.*
4 *B: Und das Gerät auf Raumschiff B?*
5 *S2: Das bewegt sich in dieselbe Richtung wie das Licht.*

⁴⁴Gemeint ist in diesem Abschnitt eine korrekte Anwendung der Geschwindigkeitsaddition im Sinne der klassischen Physik.

- 6 *B: Mhm.*
 7 *S2: Ich würd' sagen trotzdem Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 412

Schüler 2 wendet in allen Situationen das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit korrekt an.

Schülerin 3 meint, dass beide Messgeräte die gleiche Geschwindigkeit für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht messen:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit zeigt das Gerät auf Raumschiff B für das Licht an?*
 2 *S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' die Lichtgeschwindigkeit(.?)*
 3 *B: Und das auf Raumschiff A?*
 4 *S3: Auch Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 413

Die gleiche Vorhersage macht sie in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet:

- 1 *B: Und was, wenn die Lampe auf Raumschiff A platziert wäre und in Richtung Heck von*
 2 *Raumschiff A leuchtet. Was zeigt dann das Gerät ... auf Raumschiff A an ... für das*
 3 *Licht?*
 4 *S3: ... ja, auch Lichtgeschwindigkeit.*
 5 *B: Und das auf Raumschiff B?*
 6 *S3: Lichtgeschwindigkeit(.?) (lacht)*

Zitat 414

Schülerin 3 wendet in allen Situationen das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit korrekt an.

Schüler 4 meint, dass beide Geräte die gleiche Geschwindigkeit für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht messen:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?*
 2 *S4: Die Lichtgeschwindigkeit(.?)*
 3 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*
 4 *S4: Auch die Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 415

Auch in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet, macht er die gleiche Vorhersage:

- 1 *B: Und was, wenn wir die ... Lampe auf Raumschiff A platzieren und sie in Richtung Heck*
 2 *von A leuchtet? Was messen die beiden Geräte dann?*
 3 *S4: Auch die Lichtgeschwindigkeit(.?)*
 4 *B: Beide, auch das auf Raumschiff B?*
 5 *S4: Beide.*

Zitat 416

Schüler 4 wendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Situationen korrekt an.

Schüler 5 meint, dass beide Geräte die gleiche Geschwindigkeit für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht messen:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?*
2 *S5: Ähm, die Lichtgeschwindigkeit, also die 300.000 km/s.*
3 *B: Ok, und das Gerät auf Raumschiff A?*
4 *S5: Genauso ... die Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 417

Die gleiche Vorhersage macht er in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet:

- 1 *B: Was würde dann das Gerät auf A für das Licht messen?*
2 *S5: Ähm, wieder die Lichtgeschwindigkeit.*
3 *B: Und das (Messgerät; Anm.) auf Raumschiff B?*
4 *S5: Äh ... genauso die Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 418

Schüler 5 wendet in allen Situationen das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit korrekt an.

Schülerin 6 meint, dass beide Geräte die gleiche Geschwindigkeit für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht messen, begründet dies jedoch damit, dass eine höhere Geschwindigkeit nicht gemessen werden könne:

- 1 *B: Licht bewegt sich mit ... ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät*
2 *auf Raumschiff B für das Licht?*
3 *S6: Die Lichtgeschwindigkeit.*
4 *B: Und das auf Raumschiff A? Wieder für das Licht.*
5 *S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, also es kann ja ... an sich nicht mehr messen als*
6 *Lichtgeschwindigkeit ... glaub' ich (lacht), ähm, und deswegen hätt' ich jetzt so gesagt*
7 *auch Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 419

In dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet, wendet sie die klassische Geschwindigkeitsaddition an, vertauscht jedoch die Rollen der beiden Messgeräte. Auf Rückfrage korrigiert sie sich selbst:

- 1 *B: ... und sie in Richtung Heck von Rau-, Raumschiff A leuchtet, was zeigt dann das Gerät*
2 *auf Raumschiff A für die Geschwindigkeit des Lichtes an?*
3 *S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., äh, also ... eines ... langsamere Geschwindigkeit*
4 *dann, weil, wenn sich's bewegt ... ja eine langsamere Geschwindigkeit ...*
5 *B: Und das auf Raumschiff B?*
6 *S6: ... ähm, ... wieder die Lichtgeschwindigkeit, hätt' ich gesagt.*
7 *B: Ok, das heißt, das Gerät das sich relativ zur Lichtquelle gar nicht bewegt, das ... würde*
8 *eine langsamere Geschwindigkeit anzeigen und das das sich relativ zur Quelle bewegt ...*
9 *die Lichtgeschwindigkeit.*

- 10 S6: Wobei, nein, das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) würde doch die Lichtgeschwindigkeit
 11 anzeigen, weil ... oder, ich mein', es bewegt sich halt das ganze System ...
 12 B: Mhm.
 13 S6: ... vorwärts und dadurch ist der ... Endpunkt sozusagen ein anderer.
 14 B: Mhm.
 15 S6: Und deswegen is ... der Weg länger ...
 16 B: Mhm.
 17 S6: ... den das Licht ... verbraucht, also, wenn's nur die Geschwindigkeit misst, würd' ich
 18 trotzdem da Lichtgeschwindigkeit ...
 19 B: Und hier?
 20 S6: ... und da ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ...
 21 da langsamer als die Lichtgeschwindigkeit(?.?)

Zitat 420

Schülerin 6 wendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht an, verwendet jedoch die klassische Geschwindigkeitsaddition richtig, wenn sich die Lampe auf Raumschiff A befindet. Befindet sich die Lampe auf Raumschiff B, so wendet sie die klassische Geschwindigkeitsaddition implizit richtig an, da sie zwar meint, es könne kein höherer Wert als die Lichtgeschwindigkeit gemessen werden, dabei jedoch voraussetzt, dass das Licht sich tatsächlich schneller bewegen würde.

Schülerin 7 meint, dass beide Geräte den gleichen Wert für die Geschwindigkeit des von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandten Lichtes messen:

- 1 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B ...
 2 S7: Lichtgeschwindigkeit.
 3 B: ... für das Licht? Und das auf Raumschiff A?
 4 S7: Lichtgeschwindigkeit.

Zitat 421

Die gleiche Vorhersage trifft sie in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet:

- 1 B: Ok. Und wenn wir die Lampe auf Raumschiff A aufstellen und es leuchtet in Richtung
 2 Heck, was ... (würde das gerät auf Raumschiff A für die Geschwindigkeit des Lichtes
 3 messen; Anm.)
 4 S7: Lichtgeschwindigkeit.
 5 B: Und das auf Raumschiff B?
 6 S7: Lichtgeschwindigkeit.

Zitat 422

Schülerin 7 wendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Situationen korrekt an. Die Schnelligkeit, mit der sie antwortet (die Frage konnte nicht einmal fertig ausgesprochen werden), deutet auf große Sicherheit hin.

Schülerin 8 denkt zunächst darüber nach, ob die Zeitdilatation eine Auswirkung auf die Messung der Lichtgeschwindigkeit von Raumschiff A aus hat, wenn sich die Lampe auf Raumschiff B befindet. Schließlich erinnert sie sich jedoch an das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und wendet dieses an:

- 1 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?
 2 S8: 300.000 km/s.
 3 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
 4 S8: ... hm ... bewegt sich eigentlich A noch? Das, irgendwie hab' ich das die ganze Zeit
 5 ignoriert.
 6 B: Prinzipiell ...
 7 S8: Bewegen ...
 8 B: ... is ja egal ...
 9 S8: Ja. (unverständlich)
 10 B: ... wer sich bewegt, wir wissen nur, relativ zu Raumschiff A bewegt sich Raumschiff B ...
 11 S8: Mhm, ok.
 12 B: ... mit 100.000 km/s.
 13 S8: Hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... wie die im, ... meiner Sicht ... in der bewegte
 14 Zustand vergeht die Zeit ... langsamer ... im Bezug zum relativen, so war das, oder?
 15 Schon. ... aber gilt das das jetzt? Oh Gott. (lacht)
 16 B: Mhm, je-, jetzt geht's nur um die Geschwindigkeit ...
 17 S8: Ja.
 18 B: ... des Lichtes. Was das Gerät an- ...
 19 S8: Aber Licht is doch immer konstant, also würd' ich auch da 300.000 km/s sagen.

Zitat 423

Die gleiche Vorhersage macht sie in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet:

- 1 B: Was misst dann das Gerät auf A für die Geschwindigkeit des Lichts?
 2 S8: 300.000 km/s.
 3 B: Und das Gerät auf Raumschiff B?
 4 S8: ... ich bleib' mal drei, bei 300.000 km/s. (lacht)

Zitat 424

Schülerin 8 wendet in allen Situationen das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit korrekt an. Dabei zeigt sie jedoch zunächst Unsicherheiten.

Schüler 9 wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition auf das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht an:

- 1 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?
 2 S9: ... ähm, das Gerät für's ... Licht, misst ganz normale ... Lichtgeschwindigkeit, also
 3 300.000.
 4 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
 5 S9: Und ... auf Raumschiff A ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... misst's mehr als Lichtge-
 6 schwindigkeit, ähm, also ... 400.000 ... Kilometer ... Pro ... Sekunde.

Zitat 425

Ebenso wendet er die klassische Geschwindigkeitsaddition in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet, an:

- 1 B: Welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?
 2 S9: Weiterhin ... 300.000 km/s, weil's ein geschlossenes System praktisch is ... auf Raum-
 3 schiff ... B jedoch, ähm, muss man jetzt anders rechnen ..., weil der Lichtstrahl geht in
 4 die gleiche Richtung, wie das Raumschiff B sich bewegt ... deshalb is es, ähm, ... misst

5 *Raumschiff B ... 300.000 minus ... der Relativgeschwindigkeit, also 100.000, das heißt*
6 *200.000 km/s.*

Zitat 426

Schüler 9 wendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in keinem Fall an. Er zeigt große Sicherheit im Umgang mit der klassische Geschwindigkeitsaddition.

Schülerin 10 meint, dass beide Geräte die gleiche Geschwindigkeit für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht messen:

1 *B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?*
2 *S10: ... also das verändert sich glaub' ich gar nicht, diese Lichtgeschwindigkeit.*
3 *B: Und das (Gerät; Anm.) auf Raumschiff A, was misst das für das Licht?*
4 *S10: Mm, genauso, also es verändert sich nicht.*

Zitat 427

Die gleiche Vorhersage macht sie in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet:

1 *B: Mhm. Und was, wenn die Lampe auf Raumschiff A wäre und in Richtung Heck von Raum-*
2 *schiff A leuchtet, was messen dann die beiden Geräte?*
3 *S10: Ich glaube es ändert sich ... noch immer nicht, also Lichtgeschwindigkeit bleibt dann*
4 *gleich.*

Zitat 428

Schülerin 10 wendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Situationen korrekt an.

Schüler 11 meint, dass beide Geräte die gleiche Geschwindigkeit für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht messen:

1 *B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?*
2 *S11: 300.000 Kilometer.*
3 *B: Und das auf Raumschiff A?*
4 *S11: 300.000 Kilometer.*

Zitat 429

Die gleiche Vorhersage macht er in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet:

1 *B: Und wenn sich die ... Lampe auf Raumschiff A befindet und in Richtung Heck leuchtet,*
2 *was messen die Geräte dann das Licht?*
3 *S11: Also, ... das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) misst 300.000, das (Gerät auf Raumschiff*
4 *B; Anm.) misst 300.000.*

Zitat 430

Schüler 11 wendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Situationen korrekt an.

Schülerin 12 wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition auf das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht an:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit zeigt das Gerät auf Raumschiff B für das Licht an?*
 2 *S12: 300.000 Kilo-, äh, ja, 300.000 Kilometer pro ... Stunde ... Sekunde(.?)*
 3 *B: Sekunde. Und welche Geschwindigkeit zeigt das Gerät auf Raumschiff A für das Licht an?*
 4 *S12: ... ähm, die Geschwindigkeit des Lichts plus die Geschwindigkeit von ... Raumschiff*
 5 *B?*

Zitat 431

Genauso geht sie auch in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet, vor:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?*
 2 *S12: ... die ... Lichtgeschwindigkeit(.?)*
 3 *B: Und das Gerät auf Raumschiff B?*
 4 *S12: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... langsamer, als die Lichtgeschwindigkeit ..., da es*
 5 *sich in die gleiche, äh, Richtung bewegt, wie ... das Licht ausgestrahlt wird(.?)*

Zitat 432

Schülerin 12 wendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in keinem Fall an. Die klassische Geschwindigkeitsaddition wendet sie jedoch richtig an.

Schülerin 13 meint, dass beide Geräte die gleiche Geschwindigkeit für das von der Lampe auf Raumschiff B ausgesandte Licht messen, begründet dies jedoch damit, dass sich das Licht schneller als das Raumschiff bewegt:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?*
 2 *S13: 300.000 km/s.*
 3 *B: Und das Gerät auf Raumschiff A?*
 4 *S13: ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... auch 300.000 km/s, weil's, sich schneller bew-, ...*
 5 *hm ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... hm, ich glaub' auch 300.000 km/s, weil die Lampe*
 6 *..., also, weil das Licht ... eine schnellere Geschwindigkeit hat, als das Raumschiff*
 7 *selber, sozu-, na, ich wie-, hmm?*

Zitat 433

Auch ein Beispiel, in dem eine Gewehr-kugel in einem Zug abgefeuert wird, der sich schneller als die Kugel bewegt, erkennt sie nicht, dass die Geschwindigkeit des Zuges relativ zum Bahnsteig eine Auswirkung auf die Geschwindigkeit der Kugel relativ zum Bahnsteig hat⁴⁵. In dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet, wendet sie die klassische Geschwindigkeitsaddition auf das Licht an:

- 1 *B: Welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?*
 2 *S13: ... ähm, 300.000 km/s(.?)*
 3 *B: Und das Gerät auf Raumschiff B?*
 4 *S13: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... die Geschwindigkeit des Lichts minus der Geschwin-*
 5 *digkeit von Raumschiff B ...*
 6 *B: Ok.*
 7 *S13: ... weil ... sich Raumschiff B, sozusagen, in die ... gleiche Richtung bewegt wie das*
 8 *Licht ...*
 9 *B: Mhm.*

⁴⁵Obwohl sich in diesem Fall die Gewehr-kugel rückwärts im Zug bewegen würde, wenn die Relativgeschwindigkeit keine Auswirkung hätte.

10 *S13: ... und deswegen ... 200.000 km/s(??)*

Zitat 434

Nach einem Hinweis darauf, dass diese Argumentation nicht analog zu jener, im Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff B befindet, ist, erkennt sie zunächst den Widerspruch, bleibt jedoch bei ihrer Aussage:

1 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja. Aber es, ja, es macht jetzt keinen Sinn mehr,
2 irgendwie. ... also jetzt ... jetz würd‘ ich vielleicht sogar sagen ... nein, ich würd‘ nicht
3 sagen, dass es ne Auswirkung hat ...
4 B: Mhm.
5 S13: ... weil ... man sich entgegengesetzt bewegt und sozusagen sich die Geschwindigkeit
6 nicht aufhebt ...
7 B: Mhm.
8 S13: ... weil ... weil da (wenn sich die Lampe auf Raumschiff A befindet; Anm.) bewegt sich
9 das Licht in dieselbe Richtung wie Raumschiff B, deswegen ... sieht ... das ... sieht
10 das Licht eben ... langsamer aus, aus der Perspektive von Raumschiff B, als ... aus
11 Raumschiff A.

Zitat 435

Schülerin 13 wendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in keinem Fall korrekt an. Die klassische Geschwindigkeitsaddition wendet sie nur an, wenn sich daraus keine größere Geschwindigkeit als die Vakuumlichtgeschwindigkeit ergibt. Anders als Schülerin 6 begründet sie dies jedoch nicht mit der Messung, sondern mit der Bewegungsrichtung.

7.2.1.3 Reaktionen der Schüler auf die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und Aussagen zu dieser

Alle Schüler, die das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit richtig angewandt hatten, wurden um eine Erklärung für ihre Antworten gebeten. Die anderen Schüler wurden mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit konfrontiert.

Schülerin 1 meint, dass sie sich vorstellen könne, dass die Relativgeschwindigkeit keine Auswirkung habe, wenn die Geschwindigkeit des Lichtes gemessen werde. Dies begründet sie damit, dass es sich um eine nicht offensichtliche Bewegung für das menschliche Auge handle:

1 S1: ... dazu sagen ich (lacht) ..., na wenn sich's auf Licht... fokussiert, is es, ... kann
2 schon sein, dass ich ... mich da vertan hab' und, dass es halt ... nicht noch die Ge-
3 schwindigkeit vom Raumschiff dazuzählt ...

4 B: Mhm.

5 S1: ... also, wenn sich's auf's Licht fokussiert, könnte ich mir schon vorstellen, dass ich ...
6 nur die Lichtgeschwindigkeit, halt, gemessen wird.

7 B: Mhm. Ah, das heißt es wär' jetzt anders als bei dem ... gehende Passagier vorhin. Das
8 Licht würde sich das anders verhalten ...

9 S1: Ja.

10 B: ... als der Passagier. Was sagst du dazu?

11 S1: ... hm, weil ... sich ... eine Person, die sich bewegt is ja was anderes wie nur so ein

12 *Lichtstrahl der nur so ... ausstrahlt. Da is ja keine so ... offensichtliche Bewegung, für's*
13 *menschliche Auge.*

Zitat 436

Schülerin 1 ist offenbar nicht mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit vertraut. Ihre Aussage deutet darauf hin, dass sie an ein messtechnisches Problem als Ursache denkt. Weiters wirkt es so, als sähe sie die Relativgeschwindigkeit als einen Effekt an, der aus dem Messergebnis herausgerechnet werden müsste, um die „tatsächliche“ Geschwindigkeit des Lichtes zu erhalten. Dadurch wäre jedoch das Bezugssystem, in dem die Lampe sich befindet, ausgezeichnet.

Schüler 2 begründet seine Antworten mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

1 *B: ... und warum wäre das so?*
2 *S2: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... weil si-, weil sich, weil die Lichtgeschwindigkeit nie*
3 *ändert, weil sie immer gleich is. ... wenn ich zum Beisp-, wenn wir eben das Beispiel von*
4 *... von vorhin haben, wenn er, wenn der Mensch geht add-, addieren sich die Geschwin-*
5 *digkeiten, das Licht bleibt das ... Lichtgeschwindigkeit bleibt Lichtgeschwindigkeit.*

Zitat 437

Schüler 2 hat das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in sein Denken implementiert.

Schülerin 3 begründet ihre Antworten mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

1 *B: Also würdest du sagen ..., dass ... die ... Relativgeschwindigkeit zwischen Messgerät*
2 *und Lichtquelle ... keinen Einfluss auf die Messung der Lichtgeschwindigkeit hat?*
3 *S3: Ich glaub' nicht, weil, also, die Lichtgeschwindigkeit bleibt doch immer gleich, oder?*

Zitat 438

Schülerin 3 verwendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, ihre Antwort deutet jedoch auf Unsicherheit hin.

Schüler 4 begründet seine Antworten mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, bezieht jedoch auch mit ein, dass die Lichtgeschwindigkeit die Obergrenze für Geschwindigkeiten darstellt⁴⁶:

1 *B: Du würdest also sagen, dass die ... Relativgeschwindigkeit gar keinen Einfluss auf die*
2 *Messung der Lichtgeschwindigkeit hat. Warum ...*
3 *S4: Ja.*
4 *B: ... wäre das so?*
5 *S4: Weil ... die Lichtgeschwindigkeit konstant is ... und ... es nicht ... schneller geht, als*
6 *die Lichtgeschwindigkeit(.?)*

Zitat 439

⁴⁶Zumindest für Teilchen der Masse $m \geq 0 \text{ kg}$.

Schüler 4 verwendet das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, bezieht jedoch auch noch eine Erkenntnis der Relativitätstheorie in seine Überlegung mit ein. Das deutet darauf hin, dass ihm noch nicht klar ist, dass es in der gegebenen Situation nur um dieses Grundprinzip der speziellen Relativitätstheorie geht.

Schüler 5 begründet seine Antworten mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

- 1 *B: Du sagst also, dass jedes Mal, von jedem Gerät die Lichtgeschwindigkeit gemessen wird.*
 2 *S5: Ja.*
 3 *B: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Gib- hat also die Bewegung der Raumschiffe gar keinen*
 4 *Einfluss darauf?*
 5 *S5: ... Ähm ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... im ... Endeffekt, nein.*
 6 *B: Mhm, wie kommst du zu dieser Aussage?*
 7 *S5: Ahm, weil ... äh, definiert ist, dass die Lichtgeschwindigkeit immer die Lichtgeschwin-*
 8 *digkeit ist, egal in welchem System sie sich befindet, oder relativ zu welchem System.*

Zitat 440

Schüler 5 hat das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gut verinnerlicht. Ihm ist offenbar sogar klar, dass dieser experimentelle Befund als Postulat am Beginn der speziellen Relativitätstheorie steht.

Schülerin 6 merkt erneut an, dass keine höhere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit gemessen werden könne und spricht schließlich davon, dass die Relativgeschwindigkeit keinen Unterschied für die Messgeräte macht, da diese die absolute Geschwindigkeit messen würden:

- 1 *S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, also ich hätte, ... eh auch schon wie ich vorher ge-*
 2 *sagt hatte, halt, weil die Licht-, weil's ja an sich nicht geht höher als Lichtgeschwindigkeit*
 3 *zu messen ...*
 4 *B: Mhm.*
 5 *S6: ... und dass es halt ... deswegen is ...*
 6 *B: Und niedriger als die Lichtgeschwindigkeit? Weil hier hättest du ja gemeint, dass es was,*
 7 *äh, ... niedrigeres misst. Das geht ja jetzt ... offenbar auch nicht.*
 8 *S6: Mhm. ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... ja,*
 9 *also vielleicht weil's einfach wirklich halt ... die Geschwindigkeit vom Licht misst und*
 10 *das dann halt den Weg nicht berücksichtigt praktisch, oder wie, wie, wie ..., wie schnell's*
 11 *... is ...*
 12 *B: Hm, also, wenn du meinst nicht berücksichtigt, ähm, meinst du, dass ... es einfach keinen*
 13 *Unterschied macht, oder, dass man es berücksichtigen müsste und dann auf einen anderen*
 14 *Wert kommen würde?*
 15 *S6: ... naja, für's Messgerät macht's scho-, macht's anscheinend keinen Unterschied.*
 16 *B: Ok.*
 17 *S6: Und ... das misst's ja die absolute ... Geschwindigkeit vom ... dem ... Lichtstrahl,*
 18 *oder sowas, deswegen, ja, macht's keinen Unterschied hätt' ich gesagt.*

Zitat 441

Schülerin 6 meint mit der absoluten Geschwindigkeit offenbar die Geschwindigkeit, die in dem System festgestellt wird, in dem die Lichtquelle ruht. Damit betrachtet sie dieses

jeweils als ausgezeichnetes System. Sie ist offenbar nicht mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit vertraut.

Schülerin 7 begründet ihre Antworten mit dem Ergebnis der relativistischen Geschwindigkeitsaddition für den Fall, dass eine der Geschwindigkeiten die Lichtgeschwindigkeit ist:

- 1 *B: Und warum wäre das so?*
2 *S7: Weil ..., ah da gab's die Formel und wenn man das dann, wenn man c einsetzt, dann*
3 *kürzt sich das so heraus, dass c immer c is.*
4 *B: Mhm. Das heißt ...*
5 *S7: Es bleibt bei den 300.000.*

Zitat 442

Schülerin 7 gelangt zu dem richtigen Ergebnis, ohne das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bewusst anzuwenden. Ihr ist zwar klar, dass sich jedes Mal die Lichtgeschwindigkeit ergeben muss, jedoch begründet sie dies mit einer Formel, die sich als Folgerung aus diesem Prinzip ergibt.

Schülerin 8 begründet ihre Antworten mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

- 1 *B: Ok. Du hast da gemeint, dass, äh, das Licht immer konstant bleibt. Wie genau meinst du*
2 *das?*
3 *S8: ... so wie, ich glaub irgendwie das war was, was Einstein ... behauptet hat, eben dass*
4 *... Lichtgeschwindigkeit, also, dass man immer von c ausgeht ...*
5 *B: Mhm.*
6 *S8: ... und, dass sich das nicht verändert ...*
7 *B: Mhm.*
8 *S8: ... im Gegensatz zu, er hat ja auch gesagt, dass eben die ... Zeit plötzlich nicht mehr*
9 *absolut is ...*
10 *B: Mhm.*
11 *S8: ... aber, dass eben die Lichtgeschwindigkeit immer ... gleichbleibt ...*
12 *B: Mhm.*
13 *S8: ... und, dass wir immer vom selben c ausgehen.*
14 *B: Mhm. Das heißt egal wie sich Messgerät und Lichtquelle relativ zueinander bewegen, es*
15 *würde immer c messen?*
16 *S8: ... so hätt' ich's verstanden. (lacht)*

Zitat 443

Schülerin 8 hat das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gut verinnerlicht. Ihre Antwort zeigt, dass sie dieses sogar als Grundpostulat der speziellen Relativitätstheorie erfasst hat.

Schüler 9 erinnert sich nach dem Hinweis, dass alle Messgeräte immer die gleiche Geschwindigkeit messen, an das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Er fragt noch einmal nach, ob es sich um einen tatsächlichen Befund handelt, und meint schließlich, dass er es nicht intuitiv findet:

- 1 S9: Ähm, ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... also, ... eine Sache die auf jeden Fall noch fix,
 2 das Licht is konsta-, Lichtgeschwindigkeit is konstant ...
 3 B: Mhm.
 4 S9: Immer und überall ..., ähm, also, im Vakuum ... und ... (4 Sekunden Pause; Anm.)
 5 ... is es wirklich so, oder is das nur ... hypothetisch, oder is das wirklich so, dass beide
 6 das messen?
 7 B: Es is wirklich so.
 8 S9: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... bei einer Geschwindigkeit von 100.000 ... Relativ-
 9 geschwindigkeit ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... (9 Sekunden Pause; Anm.)
 10 ..., äh, nämlich genau das, so ein ähnliches Beispiel gemacht, auch mit Raumschiffen
 11 ... und es is komplett unintuitiv ...
 12 B: Mhm.
 13 S9: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., nein, also, für mich, das ... macht ... rein intuitiv
 14 überhaupt keinen Sinn.
 15 B: Ok.
 16 S9: Genau, nein ..., macht keinen Sinn.

Zitat 444

Seine Antwort deutet darauf hin, dass er das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht anwendet, da er es kontraintuitiv findet. Dieses Prinzip ist ihm offenbar bewusst, jedoch ist ihm möglicherweise nicht klar, dass es auf experimentellen Befunden basiert und nicht von Albert Einstein ohne Hintergrund erfunden wurde.

Schülerin 10 begründet ihre Antworten damit, dass Licht aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit nicht beeinflusst werden könne:

- 1 B: Mhm. Du meinst also ..., äh, hätte die Geschwindigkeit, die Relativgeschwindigkeit ir-
 2 gendeinen Einfluss auf die Lichtgeschwindigkeit?
 3 S10: Ähm, nein. Glaub' nicht.
 4 B: Und warum nicht?
 5 S10: Ähm, weil es einfach ... grundsätzlich so schnell ist, dass es nicht beeinflusst werden
 6 kann, davon.

Zitat 445

Schülerin 10 verwendet offenbar das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, sucht jedoch nach einer Ursache für diese. Ihr scheint nicht klar zu sein, dass dieses auf experimentellen Befunden beruht und nicht theoretisch begründet werden kann.

Schüler 11 begründet seine Antworten zunächst damit, dass eine höhere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit keinen Sinn ergibt, da man in der Zeit zurückreisen würde⁴⁷. Nach einem Hinweis auf den Fall, in dem die klassische Geschwindigkeitsaddition einen geringeren Wert für die Lichtgeschwindigkeit ergeben würde, begründet er seine Antwort mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

- 1 S11: Wenn, weil wenn, wenn das, wenn man schneller als Lichtgeschwindigkeit, wenn man
 2 das ja addieren würde, würd' es ja überhaupt keinen Sinn ergeben, weil, wenn wir dann
 3 ... wir sehen ja auch nur mit Lichtgeschwindigkeit ...

⁴⁷Zu dieser Erkenntnis gelangte er durch eigene Überlegungen während des Unterrichts, die er anschließend - noch vor dem Interview - mit dem Interviewer besprach.

4 B: Mhm.
5 S11: Das heißt wir, wenn, es is ja auch alles was wir, alles was passiert ... wird ja reflektiert
6 zu unserem Auge, das heißt, wenn etw-, wir sehen alles mit dieser 300.000 Kilometer
7 Verzögerung ...
8 B: Mhm.
9 S11: ... und wenn wir schneller als das sind, dann fahren wir ja ... dann sehen wir uns ja
10 selber nicht mehr im Prinzip, weil wir schneller als das is was wir wahrnehmen können
11 ...
12 B: Mhm.
13 S11: ... das heißt wir können eigentlich, wir sind, für uns is, gibt's keine Zeit.
14 B: Mhm.
15 S11: Wir können in die Zeit zurückreisen, oder davor ...
16 B: Mhm.
17 S11: ... also, es mu-, Lichtgeschwindigkeit muss immer 300.000 Kilometer sein, aus Sicht
18 eines beruhig-, ruhigen Systems.
19 B: Und ... der (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) bewegt sich jetzt aber relativ zum Licht
20 ...
21 S11: Ja, ... naja, es is ja wurscht, weil ... Lichtgeschwind-, der (das Messgerät auf Raum-
22 schiff A; Anm.) is ruhig und ... ach so, er bewegt sich relativ zum Licht?
23 B: Zur Lichtquelle und ... und damit ...
24 S11: Ja, is trotzdem 300.000.
25 B: Also sagst du, die Relativbewegung hat keinen Einfluss auf die Lichtgeschwindigkeit, die
26 gemessen wird.
27 S11: Äh, wir haben jetz ... nein s-, eh, also Lichtgeschwindigkeit is immer konstant.
28 B: Ok.
29 S11: (lacht) Ob das jetzt wirklich stimmt, mal schauen. (lacht)

Zitat 446

Schüler 11 ist offenbar interessiert daran, seine Antworten zu begründen, da er dies bereits ohne Nachfrage tut. Interessant ist, dass er seine Antworten zunächst nicht mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit begründet, obwohl ihm dieses bekannt ist. Sein Nachsatz macht deutlich, dass er sich bei seiner Antwort nicht ganz sicher ist.

Schülerin 12 erklärt nach dem Hinweis, dass alle Geräte die gleiche Geschwindigkeit für das Licht messen, dass ihr das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit bewusst ist, dieses jedoch keinen Sinn für sie ergibt:

1 S12: Mhm, also ich weiß, dass ... Lichtgeschwindigkeit ein konstant-, eine konstante Ge-
2 schwindigkeit is ...
3 B: Mhm.
4 S12: ..., aber ... ich kann mir nicht ganz erklären, wieso, deshalb ...
5 B: Mhm.
6 S12: ... es ergibt, es ergibt für mich keinen Sinn, aber es ... is so ... ja. (lacht)

Zitat 447

Schülerin 12 hätte gerne eine Begründung für das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Ihr ist offenbar nicht bewusst, dass dieses auf experimentellen Befunden beruht, und nicht theoretisch begründet werden kann.

Schülerin 13 meint, dass das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit keinen Sinn ergebe:

- 1 *S13: Mm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... es macht irgendwie ein bisschen wenig Sinn,*
2 *zumindest ... da wo sie, äh, wo Raumschiff B und ... die Lichtrichtung gleich sind,*
3 *ähm, weil man eben denkt, dass das bewegte ... Bezugssystem ... die Geschwindigkeit*
4 *anders wahrnimmt, wenn sie sich in dieselbe Richtung bewegt, ... weil, ... sich das*
5 *Bezugssystem eben selbst bewegt.*

Zitat 448

Schülerin 13 ist das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit offenbar nicht bekannt.

7.2.2. Zusammenfassung

Die klassische Geschwindigkeitsaddition wenden alle Schüler in dem Fall, dass der Passagier auf Raumschiff B geht und seine Geschwindigkeit vom Gerät auf Raumschiff A aus gemessen wird, korrekt an. In dem Fall, dass der Passagier sitzt und seine Geschwindigkeit von Raumschiff A aus gemessen wird, benötigt eine Schülerin Hilfe. Soll die Geschwindigkeit des gehenden Passagiers vom Gerät in Raumschiff B bestimmt werden, benötigt eine Schülerin Hilfe, und eine weitere beantwortet die Frage falsch. Die meisten Probleme ergeben sich, wenn die Geschwindigkeit des sitzenden Passagiers vom Gerät auf Raumschiff B aus bestimmt werden soll. Hier benötigen fünf Schüler Hilfe, finden dann jedoch zur korrekten Antwort. Insgesamt wenden die meisten Schüler die klassische Geschwindigkeitsaddition richtig an. Die Probleme bei der Antwort auf die Frage nach der vom Gerät auf Raumschiff B für den sitzenden Passagier gemessene Geschwindigkeit deuten auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung hin.

Alle 13 befragten Schüler nennen den richtigen Wert für die Geschwindigkeit des Lichtes, wenn diese von einem Messgerät, das sich auf dem gleichen Raumschiff wie die Lichtquelle befindet, gemessen wird. Acht Schüler lösen auch die anderen Aufgaben zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit richtig. Eine Schülerin wendet die Klassische Geschwindigkeitsaddition in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff A befindet, falsch an, eine wendet sie in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff B befindet, nicht an, und nennt den richtigen Wert. Dies tut sie jedoch nicht aufgrund des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, sondern, da sie meint, die Lichtgeschwindigkeit könne nicht überschritten werden. Vier Schüler wenden die klassische Geschwindigkeitsaddition korrekt an, wenn sich die Lampe auf Raumschiff B befindet, ebenfalls vier tun dies, wenn sie sich auf Raumschiff A befindet. Zwei der Schülerinnen, die die Aufgaben nicht korrekt lösen, nennen zwar in dem Fall, dass sich die Lampe auf Raumschiff B befindet, den richtigen Messwert, eine begründet dies jedoch damit, dass eine höhere Geschwindigkeit nicht gemessen werden könne, und die andere damit, dass das Licht eine höhere Geschwindigkeit habe als das Raumschiff.

Drei Schülern ist das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit offenbar nicht bekannt, fünf Schüler begründen ihre Antworten mit dem Prinzip der Konstanz der Licht-

7.3. Gleichzeitigkeit

7.3.1. Auswertung der Interviews zur Gleichzeitigkeit

Schülerin 1 spricht die Lichtlaufzeit an, nachdem ihr gesagt wird, dass die Geräte immer zu unterschiedlichen Resultaten gelangen:

Schüler 2 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, da F1 sich näher am Messgerät befinde:

Er akzeptiert, dass dieser Effekt bei der Messung berücksichtigt werden kann, bezieht ihn jedoch bei der nächsten Frage zur Gleichzeitigkeit wieder ein:

184

Er akzeptiert erneut, dass dieser Effekt berücksichtigt werden kann.

Schülerin 3 spricht den Effekt der Lichtlaufzeit an, gelangt jedoch zunächst auch mit dem Hinweis, dass diese Effekte vernachlässigt werden können, zu dem Ergebnis, dass das Gerät auf Raumschiff A feststellt, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S3: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' nicht, dass Raumschiff A zeigt, dass sie*
- 2 *gleichzeitig eingeschaltet werden. Ich glaub' das kann halt nur dieses Messgerät (auf*
- 3 *Raumschiff B; Anm.) machen.*
- 4 *B: Was wäre da die Ursache dafür?*
- 5 *S3: Weil sich das ... Raumschiff bewegt?*
- 6 *B: Mhm.*
- 7 *S3: ... und ich glaub' das kann nur ein ruhender Betrachter halt machen, es ... eine Gleich-*
- 8 *zeitigkeit messen ...*
- 9 *B: Mhm. Ok.*
- 10 *S3: ... und in der Mitte von ... den zwei Bildschirmen.*
- 11 *B: Wir können ja so tun als werden, würden die in der Mitte stehen. Wir können ja auch*
- 12 *das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) so hinstellen, dass die (Fernseher F1 und F2;*
- 13 *Anm.) gleich weit entfernt sind. Was würde es dann anzeigen? Gleichzeitig, oder nicht*
- 14 *gleichzeitig?*
- 15 *S3: Hm, trotzdem nicht gleichzeitig weil's so, sich vorbeibewegt.*

Bei der zweiten Frage, zu den Fernsehern F3 und F4, berücksichtigt sie Effekte der Lichtlaufzeit zunächst nicht. Bei der Frage, welchen Effekt die Bewegung bewirken würde, spricht sie an, dass es aus der Sicht eines relativ zu den Fernsehern bewegten Raumschiffs anders aussehen würde:

- 1 *S3: Dann sieht's so aus, ... wenn man jetzt zum Beispiel ... einen Betrachter hat und der*
- 2 *steht hier (wo sich das Messgerät auf B befindet; Anm.) und nicht in der Mitte, dann*
- 3 *sieht's so aus, als würde das eine Ereignis später stattfinden als das andere, obwohl sie*
- 4 *von der Sicht (des Geräts auf Raumschiff A; Anm.) gleichzeitig ... stattfinden würden,*
- 5 *aber ...*
- 6 *B: Ok, also du ... meinst, dass es um den Abstand gehen würde ... und wie lange das Licht*
- 7 *dann braucht zum Messgerät zu kommen.*
- 8 *S3: ... Ja, also ist das ... ein Licht, oder ist das (unverständlich) ...*
- 9 *B: Naja, wenn die Fernseher sich einschalten, dann ... kann man das Licht davon ja ...*
- 10 *S3: Naja, weil, wenn das Licht ... äh, von einem ... also ins Raumschiff eindringt ...*
- 11 *B: Mhm.*
- 12 *S3: ... und dann ... gleichzeitig nach vorne und zurück, dann sollten sie gleichzeitig angehen.*
- 13 *B: Mhm.*
- 14 *S3: Aber wenn das andere Raumschiff sich bewegt und das Licht strahlt rein, dann kommt's*
- 15 *zuerst hinten an und dann vorne, deshalb würden die Fernseher halt unterschiedlich ...*
- 16 *B: Ok.*
- 17 *S3: ... zu unterschiedlichen Zeiten angehen.*

Die Vorstellung, dass die beiden Geräte zu verschiedenen Ergebnissen gelangen, obwohl die Lichtlaufzeit berücksichtigt wird, bereitet ihr anschließend Probleme.

Schüler 4 argumentiert zunächst, dass die Lichtlaufzeit dafür sorgen würde, dass das Gerät auf Raumschiff A misst, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S4: Ähm, nicht gleichzeitig.*
2 *B: Und warum wäre das so?*
3 *S4: Ähm, weil ... der Weg ein anderer is. Heißt, sie würden sagen, dass ... F1 vor F2 ...*
4 *B: Mhm.*
5 *S4: ... eingeschalten wird.*

Zitat 454

Er akzeptiert, dass die Messgeräte diesen Effekt berücksichtigen können und bezieht ihn anschließend nicht mehr in seine Überlegungen mit ein.

Schüler 5 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, da F1 sich näher am Messgerät befindet:

- 1 *S5: Ähm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... es ... wird einen Unterschied messen, würd'*
2 *ich sagen, also, dass der, äh, Erste ... früher war als der Zweite.*
3 *B: Mhm, und ... wieso wäre das so?*
4 *S5: Ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... weil ... sich das, weil sich ja das, äh, Raumschiff*
5 *A an Raumschiff B vorbeibewegt und dadurch ... ähm, der Erste näher am Raumschiff*
6 *war, als ... der Zweite, für Raumschiff A.*

Zitat 455

Er akzeptiert zwar, dass dieser Effekt bei der Messung berücksichtigt werden kann, bezieht ihn jedoch bei der nächsten Frage wieder in seine Überlegungen mit ein:

- 1 *S5: Ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... jetzt, rein logisch einfach eben, dass sie in dem*
2 *Fall jetzt nicht gleichzeitig waren, also, dass der ..., äh, Dreier (F3; Anm.) zuerst war*
3 *und der ..., nein der Vierer (F4; Anm.) zuerst war und dann der Dreier (F3; Anm.).*
4 *B: Mhm, und warum wäre das so?*
5 *S5: Ähm, damit sich das eben aufhebt, was ich vorhin gesagt hab', dass der eine zuerst war*
6 *und der andere erst danach.*

Zitat 456

Er akzeptiert erneut, dass der Effekt berücksichtigt werden kann und beantwortet die Frage ohne Bezug auf diesen.

Schülerin 6 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, da das Licht des einen Fernsehers aufgrund der Relativbewegung früher beim Messgerät ankommt:

- 1 *S6: Ich würd' sagen, dass es ... nicht gleichzeitig is, weil ... halt das bewegt sich ja vorbei*
2 *und dadurch merkt's praktisch früher, dass der eine eingeschalten wurde, als der andere.*

3 *B: Mhm, also, weil das Licht halt da erst hinkommen muss ...*
4 *S6: Ja genau.*

Zitat 457

Sie akzeptiert, dass der Effekt berücksichtigt werden kann, begründet ihre Antwort bei der nächsten Frage jedoch erneut mit diesem:

1 *S6: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschalten werden.*
2 *B: ... und warum?*
3 *S6: (lacht), ähm, ja halt, ich hätt' das so gesagt wie vorher, is halt einfach nur ... anders*
4 *von den Positionen, also, es is ...*
5 *B: Mhm.*
6 *S6: ... zuerst halt, weil, dadurch wenn's vorbeigeht und dann wird's eingeschalten, is es ja*
7 *nicht ... gleichzeitig, dass es in dem Raumschiff B dann ... gleichzeitig is ...*
8 *B: Mhm.*
9 *S6: ... weil, eben wie vorher auch schon gesagt, dass es halt das eine zuerst misst, also wenn's*
10 *so geht, merkt's das F4 zuerst und dann den F3 und ... ja das für Raumschiff B da, da*
11 *bemerkt's sozusagen beide ... gleichzeitig.*

Zitat 458

Sie akzeptiert erneut, dass die Lichtlaufzeit berücksichtigt werden kann, und spricht diese später nicht mehr an.

Schülerin 7 meint, dass aus Sicht des Messgeräts auf Raumschiff A der Fernseher F2 zuerst eingeschaltet werde, weil er sich zuerst am Gerät vorbeibewege:

1 *S7: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschalten werden?*
2 *B: Mhm.*
3 *S7: Weil ... gleichzeitig is es ja nur, wenn von dem Betrachter aus ...*
4 *B: Mhm.*
5 *S7: ... die Positionen der Fernseher genau in der Mitte is ...*
6 *B: Mhm.*
7 *S7: ... also der Winkel quasi is, ... muss gleich groß sein.*
8 *B: Mhm.*
9 *S7: Und ... wenn sich das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) jetzt bewegt, dann verändert*
10 *sich ja ... die ...*
11 *B: Mhm.*
12 *S7: ... dieser Winkel.*
13 *B: Mhm.*
14 *S7: Also würde von ... dem Betrachter, also von dem Raumschiff A ... (6 Sekunden Pause;*
15 *Anm.) ... entweder der Fernseher 1, oder der Fernseher 2 zuerst eingeschalten werden*
16 *und nicht gleichzeitig.*
17 *B: Mhm, was würdest du da schätzen, welcher würde denn zuerst eingeschalten werden?*
18 *S7: ... Fernseher ... 2(?.?)*
19 *B: Weil?*
20 *S7: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... weil wir uns in die Richtung bewegen und dann is der*
21 *Fernseher 2 zuerst dran und dann erst der Fernseher 2.*

Zitat 459

Bei der nächsten Frage meint sie, dass das Gerät auf B messe, dass zuerst F3 eingeschaltet werde, weil dieser sich näher am Messgerät befinde:

- 1 *S7: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschalten werden, ... sondern, dass der Fernseher 3 zuerst*
 2 *eingeschalten wird und dann der Fernseher 4(.?)*
 3 *B: Mhm, warum wäre der ... Fernseher 3 zuerst eingeschalten?*
 4 *S7: Weil er näher beim Messgerät steht.*

Zitat 460

Auf die Anmerkung, dass dieser Effekt berücksichtigt werden könnte, entgegnet sie, dass dennoch F4 weiter vom Gerät entfernt sei:

- 1 *S7: Ja aber ... trotzdem ist die Länge zwischen ... Fernseher, also, in der Abbildungen*
 2 *zwischen dem Messgerät und Fernseher 4 länger als die ... Länge zwischen Fernseher*
 3 *3(.?)*

Zitat 461

Schülerin 7 meint, dass die Entfernung des Messgeräts zu den Fernsehern nicht einfach berücksichtigt werden könne. Ihre Antworten sind deshalb davon geprägt, dass sie die Lichtlaufzeit in ihre Überlegungen miteinbezieht.

Schülerin 8 erklärt zunächst, dass gemessen würde, dass der Fernseher, der sich näher am Messgerät befindet, früher eingeschaltet werde:

- 1 *S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... wahrscheinlich wird es anzeigen, dass das was*
 2 *näher ist sich früher einschaltet, als das was ... sich davon weg-, wegbewegt(.?)*

Zitat 462

Nach einem Hinweis, dass die Abstände von den Geräten berücksichtigt werden, bezieht sie die Signallaufzeit nicht mehr in ihre Überlegungen mit ein.

Schüler 9 spricht zunächst an, dass es für das Gerät auf Raumschiff A eine Verzögerung der Signale gebe:

- 1 *S9: Ähm, das Gerät auf Raumschiff A ... also, auf Raumschiff B wird die Gleichzeitigkeit*
 2 *gemessen ... und auf Raumschiff ... B haben wir natürlich eine Verzögerung der Signale.*

Zitat 463

Er akzeptiert, dass die Abstände und Signallaufzeiten bei der Messung berücksichtigt werden können, und bezieht diese anschließend nicht mehr in seine Überlegungen mit ein.

Schüler 11 meint zunächst, dass es aufgrund der Lichtlaufzeit dazu käme, dass das Gerät auf Raumschiff A misst, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, da die Abstände verschieden sind:

- 1 *S11: Wird das mit Licht ... übertragen?*
 2 *B: Die Messung an sich ist nicht wichtig, weil Effekte ...*
 3 *S11: Ja, nein, es ist aber nicht das ... Zeitverhältnis ...*
 4 *B: ... werden einberechnet.*
 5 *S11: ... der k-Faktor, im Sinne, also der, der k-Faktor hier, äh, merkbar ist, weil wir ein*
 6 *Drittel der Lichtgeschwindigkeit fahren, also 33 Prozent ...*

7 *B: Mhm.*
 8 *S11: ... da spüren wir schon einen Unterschied in der Zeit ...*
 9 *B: Mhm.*
 10 *S11: ... und sie hier, wenn ich, ich kann's mir leichter mit Lichtstrahlen vorstellen ...*
 11 *B: Ja.*
 12 *S11: ... ähm hier ein Lichtstrahl, hier ... also der Weg von dem hier is kürzer als von dem*
 13 *...*
 14 *B: Mhm.*
 15 *S11: ... von F1 ...*
 16 *B: Äh, wenn wir ...*
 17 *S11: (unverständlich)*
 18 *B: ... wenn wir das Gerät in die Mitte stellen würden?*
 19 *S11: Ähm ... dann würd' es gleichzeit- ... wenn wir das Gerät in die Mitte stellen würden*
 20 *...*
 21 *B: Kann man ja machen. ... es liegt dann da in der Mitte.*
 22 *S11: ... es ist dann gleichzeitig. ... äh, das is dasselbe mit dem Blitz, wenn man sich's*
 23 *vorstellen kann ...*
 24 *B: Mhm.*
 25 *S11: Wenn man den da sieht und da ein Blitz einschlägt und da ...*
 26 *B: Mhm.*
 27 *S11: und da ein (unverständlich) is so, ... is derselbe Abstand, sollte es dann gleichzeitig*
 28 *passieren ...*

Zitat 464

Er akzeptiert, dass dieser Effekt bei der Messung berücksichtigt werden kann, bringt ihn jedoch bei der Frage danach, was das Gerät auf Raumschiff B für die Fernseher F3 und F4 anzeigt, erneut ins Spiel:

1 *S11: Weil hier das ... Signal, also, wenn ich's mir wieder mit dem Licht vorstell', man*
 2 *kann sich's auch über die Zeit vorstellen, für mich ist das komplizierter, ähm, einfach,*
 3 *sozusagen mit diesen, diesen Pendellichtuhren. Ich hab, äh, ich wechsel mich ab mit der*
 4 *Vorstellung, aber grad stell ich mir das einfach so vor, ähm, das eben F3 ... ah, einen*
 5 *läng-, äh, kürzeren Weg ...*

Zitat 465

Schüler 11 akzeptiert erneut, dass die Lichtlaufzeit bei der Messung berücksichtigt werden kann, und bezieht diese anschließend nicht mehr in seine Überlegungen mit ein.

Schülerin 12 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F2 zuerst eingeschaltet werde, da er sich als erstes am Gerät vorbeibewege:

1 *S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass zuerst F2 eingeschalten wird?*
 2 *B: Und warum wäre das so?*
 3 *S12: Ähm, ... weil es zuerst an F2 vorbeifliegt.(?)*

Zitat 466

Sie akzeptiert, dass die Lichtlaufzeit bei der Messung berücksichtigt werden kann, meint jedoch bei der nächsten Frage, dass das Messgerät auf Raumschiff A erst später sehe, dass F3 eingeschaltet werde:

1 *S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., ahm, ... da aus Sichtpunkt von A ... es (das*
 2 *Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) zuerst an F4 und an F3 vorbeikommt und wenn sie*
 3 *(unverständlich), wobei, wenn sich zuerst F4 einschaltet ... es danach erst sieht, wann*
 4 *ich F3 einschaltet, das heißt, es weiß nicht, ob F3 davor schon eingeschaltet war, oder*
 5 *nicht.*

Zitat 467

Schülerin 12 argumentiert in diesem Fall weiterhin damit, dass das Gerät auf Raumschiff A nicht wisse, ob F3 schon eingeschaltet worden sei, bevor es an diesem vorbeifliege. Dabei denkt sie offenbar an die Unzulänglichkeit des Messgeräts, und weniger an die Signallaufzeit.

7.3.1.2 Schülervorstellungen zur Gleichzeitigkeit

Fünf der befragten Schüler meinen von selbst⁴⁸, dass die Geräte auf den beiden Raumschiffen zu verschiedenen Resultaten gelangen.

Schülerin 1 meint, dass beide Geräte immer zu denselben Messergebnissen gelangen:

1 *B: Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A für diese Fernseher an?*
 2 *S1: Auch, dass sie ... zur gleichen Zeit eingeschaltet werden.*
 3 *B: Mhm ... und ..., wenn das Gerät auf Raumschiff A misst, dass die Fernseher F3 und*
 4 *F4 auf Raumschiff B gleichzeitig eingeschaltet werden, was zeigt dann das Messgerät auf*
 5 *Raumschiff B für diese Fernseher an?*
 6 *S1: Auch, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.*

Zitat 468

Sie sieht nur einen Messfehler als mögliche Ursache für ein anderes Resultat an:

1 *B: Würdest du sagen es gibt überhaupt eine Möglichkeit, dass sie (die beiden Messgeräte;*
 2 *Anm.) zu verschiedenen Messergebnissen kommen?*
 3 *S1: ... hm, ja, wenn's irgendeine ... technische Verzögerung gibt.*

Zitat 469

Schülerin 1 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und kann sich nur Messfehler als Ursache für dem widersprechende Ergebnisse vorstellen.

Schüler 2 meint, nachdem Effekte der Lichtlaufzeit besprochen wurden, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 *S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... es wird messen, dass es, sie nicht gleichzeitig einge-*
 2 *schaltet werden.*
 3 *B: Und warum wäre das so?*
 4 *S2: ... weil es (Raumschiff A; Anm.) sich ja wegbewegt und somit der eine Bildschirm näher*
 5 *zum Raumschiff is als der andere Bildschirm.*
 6 *B: Und wenn die Messgeräte die Abstände mitberücksichtigen und einrechnen ... und über*
 7 *einen Zeitraum die Daten sammeln und dann auswerten, was wäre dann?*

⁴⁸bzw. nur mit Hinweisen dazu, dass die Lichtlaufzeit von den Messgeräten berücksichtigt wird.

S2: dann müsste es (das Gerät auf Raumschiff A; Anm.) gleichzeitig messen.

Zitat 470

Er argumentiert analog für den Fall, dass bestimmt werden müsse, was das Gerät auf Raumschiff B für die Fernseher F3 und F4 anzeigt:

1 S2: Na, jetzt ... wird's, es ... Gerät auf Raumschiff B messen, dass sie ungl-, nicht gleichzeitig
2 eingeschaltet werden.

3 *B: Und wenn die Abstände wieder berücksichtigt werden?*

4 S2: Dann wird's wieder messen, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.

Zitat 471

Schüler 2 sieht Gleichzeitigkeit als etwas Absolutes an.

Schülerin 3 gibt zunächst an, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 zu verschiedenen Zeitpunkten eingeschaltet werden:

1 S3: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub‘ nicht, dass Raumschiff A zeigt, dass sie
2 gleichzeitig eingeschaltet werden. Ich glaub‘ das kann halt nur dieses Messgerät (auf
3 Raumschiff B; Anm.) machen.

4 B: Was wäre da die Ursache dafür?

5 S3: Weil sich das ... Raumschiff bewegt?

6 *B: Mhm.*

7 S3: ... und ich glaub' das kann nur ein ruhender Betrachter halt machen, es ... eine Gleich-
8 zeitigkeit messen ...

9 B: Mhm. Ok.

10 *S3: ... und in der Mitte von ... den zwei Bildschirmen.*

11 B: Wir können ja so tun als werden, würden die in der Mitte stehen. Wir können ja auch
12 das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) so hinstellen, dass die (Fernseher F1 und F2;
13 Anm.) gleich weit entfernt sind. Was würde es dann anzeigen? Gleichzeitig, oder nicht
14 gleichzeitig?

15 *S3: Hm, trotzdem nicht gleichzeitig weil's so, sich vorbeibewegt.*

Zitat 472

Dabei klingt ihre Aussage so, als sähe sie nicht die Lichtlaufzeit als Ursache für die verschiedenen Messergebnisse an. Zu dem gleichen Schluss gelangt sie auch bei der nächsten Frage:

1 S3: ... (13 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht
2 ... ich weiß es nicht. (lacht) ... hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... das (Gerät auf
3 Raumschiff A; Anm.) misst, dass sie gleichzeitig ... sind, aber das würde jetzt nicht ...

4 B: Was würde das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) dann anzeigen?

5 *S3: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass sie sich ... nicht gleichzeitig einschalten, oder*
6 *... (seufzt)*

Zitat 473

Bei ihrer Antwort auf eine Nachfrage, wie die Relativbewegung diesen Unterschied bewirken würde, wird deutlich, dass sie sehr wohl die Abstände der Fernseher von den Messgeräten und die Lichtlaufzeit als Begründung für die verschiedenen Messergebnisse sieht:

1 S3: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, ... wenn es sich bewegt, dann ... entsteht halt
2 eine Relativgeschwindigkeit(.?)
3 B: Mhm.
4 S3: und (lacht), das is voll kompliziert ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... na weil, ah ja,
5 wenn sich das eine halt weiterbewegt ...
6 B: Mhm.
7 S3: Dann sieht's so aus, ... wenn man jetzt zum Beispiel ... einen Betrachter hat und der
8 steht hier (wo sich das Messgerät auf B befindet; Anm.) und nicht in der Mitte, dann
9 sieht's so aus, als würde das eine Ereignis später stattfinden als das andere, obwohl sie
10 von der Sicht (des Geräts auf Raumschiff A; Anm.) gleichzeitig ... stattfinden würden,
11 aber ...
12 B: Ok, also du ... meinst, dass es um den Abstand gehen würde ... und wie lange das Licht
13 dann braucht zum Messgerät zu kommen.
14 S3: ... Ja, also ist das ... ein Licht, oder ist das (unverständlich) ...
15 B: Naja, wenn die Fernseher sich einschalten, dann ... kann man das Licht davon ja ...
16 S3: Naja, weil, wenn das Licht ... äh, von einem ... also ins Raumschiff eindringt ...
17 B: Mhm.
18 S3: ... und dann ... gleichzeitig nach vorne und zurück, dann sollten sie gleichzeitig angehen.
19 B: Mhm.
20 S3: Aber wenn das andere Raumschiff sich bewegt und das Licht strahlt rein, dann kommt's
21 zuerst hinten an und dann vorne, deshalb würden die Fernseher halt unterschiedlich ...
22 B: Ok.
23 S3: ... zu unterschiedlichen Zeiten angehen.
24 B: Und wenn das Messgerät das berücksichtigen würde und die Daten über einen Zeitraum
25 hinweg sammelt und dann auswertet und dabei berücksichtigt wo sich was befindet zu
26 welchem Zeitpunkt ... was würd's dann anzeigen?
27 S3: ... dann zeigt es ... auch eigentlich an zumindest, dass sich das ... also, dass das
28 Raumschiff sich bewegt, oder?
29 B: Ja, ob die (Fernseher F3 und F4; Anm.) gleichzeitig eingeschaltet werden, oder nicht is
30 immer die Frage.
31 S3: Ja und wenn sie gleichzeitig eingeschalten sind dann ... bewegt es sich ... nicht, oder?
32 Wenn die Lichtquelle in der Mitte is ...
33 B: Mhm, ... also wenn wir sagen, die Messgeräte berücksichtigen Abstände, das kann man
34 ja einrechnen, das geht prinzipiell ... oder wir stellen sie einfach in die Mitte, das kann
35 man auch machen ... dann sagt dieses Gerät auf Raumschiff A, F3 und F4 werden
36 gleichzeitig eingeschaltet. Jetzt berücksichtigt dieses Messgerät hier (auf Raumschiff B;
37 Anm.) auch die Abstände. Was würde es dann sagen? Auch, dass F3 und F4 gleichzeitig
38 eingeschaltet werden, oder ... würde es trotzdem sagen „nicht gleichzeitig“?
39 S3: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' dann, dann würde es sagen, dass sie gleich-
40 zeitig eingeschaltet sind ...
41 B: Mhm.
42 S3: ... wenn ich, also dieses Messgerät hier.

Zitat 474

Schülerin 3 hat offenbar einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und sieht als Erklärung für dem widersprechende Messergebnisse die Lichtlaufzeit an.

Schüler 4 meint, nach einem Gespräch über die Lichtlaufzeit, dass das Gerät auf Raumschiff A dennoch messe, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, da es sich in einem anderen Bezugssystem als das Gerät auf Raumschiff B befindet:

1 S4: Ähm, nicht gleichzeitig.
2 B: Und warum wäre das so?
3 S4: Ähm, weil ... der Weg ein anderer is. Heißt, sie würden sagen, dass ... F1 vor F2 ...
4 B: Mhm.
5 S4: ... eingeschalten wird.
6 B: Und was, wenn die Messgeräte den Weg berücksichtigen und einrechnen würden?
7 S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... heißt, sozusagen, dass F2 kurz davor ... eingeschalten
8 wird.
9 B: Beide Geräte berücksichtigen jeweils die Abstände ...
10 S4: Mhm.
11 B: ... zu den Fernsehern. Das Gerät auf B zeigt an, die sind gleichzeitig eingeschaltet worden.
12 S4: Mhm.
13 B: Was würde dann das Gerät auf Raumschiff A anzeigen?
14 S4: ... noch immer nicht gleichzeitig.
15 B: Und warum?
16 S4: ... weil A in einem andern Bezugssystem is.
17 B: Und das bedeutet?
18 S4: Das, was für B gleichzeitig is, ... kann nicht für A gleichzeitig sein.

Zitat 475

Analog dazu meint er, dass das Gerät auf Raumschiff B messe, dass F3 und F4 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, da es sich in einem anderen Bezugssystem als das Gerät auf Raumschiff A befinde:

1 S4: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschaltet werden ... wieder, dasselbe, mit andern Bezugs-
2 systemen.
3 B: Ok. Und ... welche ... der beiden Aussagen würde jetzt stimmen? Dass sie gleichzeitig
4 eingeschaltet wurden, oder, dass sie nicht gleichzeitig eingeschaltet wurden?
5 S4: Beides stimmt für das jeweilige Bezugssystem, ... es kommt drauf an wie man's sieht.

Zitat 476

Schüler 4 hat eine gute Vorstellung der Relativität der Gleichzeitigkeit und wendet das Relativitätsprinzip korrekt an.

Schüler 5 meint, nach einem Gespräch über die Lichtlaufzeit, dass das Gerät auf Raumschiff B zum gleichen Resultat gelange, wie das Gerät auf Raumschiff A:

1 S5: Ähm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... es ... wird einen Unterschied messen, würd'
2 ich sagen, also, dass der, äh, Erste ... früher war als der Zweite.
3 B: Mhm, und ... wieso wäre das so?
4 S5: Ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... weil ... sich das, weil sich ja das, äh, Raumschiff
5 A an Raumschiff B vorbeibewegt und dadurch ... ähm, der Erste näher am Raumschiff
6 war, als ... der Zweite, für Raumschiff A.
7 B: Mhm, und wenn das Messgerät die Daten über einen längeren Zeitraum hinweg sammelt
8 und nachher auswertet und damit berücksichtigt, wie weit sich die Fernseher entfernt
9 befinden, wie würde es dann ausschauen?
10 S5: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... gute Frage
11 und dann ... würd' ich sagen hebt sich das wahrscheinlich auf, also dann sind sie, wird's
12 wieder wahrscheinlich gleich mess-, gleichmäßig, gleichzeitig ... gemessen.

Zitat 477

Ebenso meint er, nach einem erneuten Gespräch über die Lichtlaufzeit, dass das Gerät auf Raumschiff B messe, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 S5: Ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... jetzt, rein logisch einfach eben, dass sie in dem
2 Fall jetzt nicht gleichzeitig waren, also, dass der ..., äh, Dreier (F3; Anm.) zuerst war
3 und der ..., nein der Vierer (F4; Anm.) zuerst war und dann der Dreier (F3; Anm.).
4 B: Mhm, und warum wäre das so?
5 S5: Ähm, damit sich das eben aufhebt, was ich vorhin gesagt hab', dass der eine zuerst war
6 und der andere erst danach.
7 B: Mhm, und wenn die Messgeräte wieder die Abstände berücksichtigen, wie würde es dann
8 ausschaun?
9 S5: ... Ähm ... genau wie vorhin, also, dass das dann gleichzeitig war.

Zitat 478

Schüler 5 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff und hätte abweichende Ergebnisse mit der Lichtlaufzeit begründet.

Schülerin 6 denkt, nach einem Gespräch über die Lichtlaufzeit, dass das Gerät auf Raumschiff A auch unter Berücksichtigung dieser anzeige, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 S6: Ich würd' sagen, dass es ... nicht gleichzeitig is, weil ... halt das bewegt sich ja vorbei
2 und dadurch merkt's praktisch früher, dass der eine eingeschalten wurde, als der andere.
3 B: Mhm, also, weil das Licht halt da erst hinkommen muss ...
4 S6: Ja genau.
5 B: ... und ... das, man könnte ja die Abstände ... bestimmen und die Positionen und dann
6 wüsste man ja wie lang das Licht braucht und man könnte das ja einrechnen ... und
7 das Messgerät kann ja dann über einen ... längeren Zeitraum die Daten sammeln und
8 nachher das einrechnen ... und, ähm, herausrechnen, diese Effekte. Was würde es dann
9 anzeigen?
10 S6: ... wahrscheinlich immer noch, dass es nicht gleichzeitig is.(?)
11 B: Und warum?
12 S6: ... ähm, ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ja einfach, weil sich's halt dadurch, dass es
13 sich vorbeibewegt, dass es dann was anderes anzeigt.
14 B: Mhm. Und wär' diese Anzeige dann prinzipiell richtig, oder wär' die dann falsch?
15 S6: Schon richtig, halt aus dem, ... aus der Sicht von dem Raumschiff A.

Zitat 479

Auch für das Ergebnis des Messgeräts auf Raumschiff B für die Fernseher F3 und F4 macht sie, nach einem erneuten Gespräch über die Lichtlaufzeit, eine analoge Vorhersage:

- 1 S6: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschalten werden.
2 B: ... und warum?
3 S6: (lacht), ähm, ja halt, ich hätt' das so gesagt wie vorher, is halt einfach nur ... anders
4 von den Positionen, also, es is ...
5 B: Mhm.
6 S6: ... zuerst halt, weil, dadurch wenn's vorbegeht und dann wird's eingeschalten, is es ja
7 nicht ... gleichzeitig, dass es in dem Raumschiff B dann ... gleichzeitig is ...
8 B: Mhm.

9 S6: ... weil, eben wie vorher auch schon gesagt, dass es halt das eine zuerst misst, also wenn's
 10 so geht, merkt's das F4 zuerst und dann den F3 und ... ja das für Raumschiff B da, da
 11 bemerkt's sozusagen beide ... gleichzeitig.
 12 B: Mhm. Und ... tatsächlich ... könnte man ja auch diese Effekte berücksichtigen auch wo's
 13 vor, zuerst vorbeifliegt. Was würde es dann anzeigen, wenn man das alles berücksichtigt?
 14 Nämlich beide Messgeräte.
 15 S6: Wahrscheinlich wieder, dass was Unterschiedliches gleichzeitig is.
 16 B: ... und warum?
 17 S6: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, weil halt von ... einem anderen ... Standpunkt
 18 ausgegangen wird, sozusagen ...

Zitat 480

Schülerin 6 sieht den Gleichzeitigkeitsbegriff als relativ an. Insbesondere wendet sie das Relativitätsprinzip in der gegebenen Situation korrekt an. Ihre Aussagen machen klar, dass sie nicht an einen Messfehler als Ursache denkt, obwohl es ihr nicht gelingt, eine Erklärung für den Unterschied zu finden.

Schülerin 7 kommt zwar zu dem richtigen Schluss, dass das Gerät auf Raumschiff A misst, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, begründet dies jedoch damit, dass F2 sich zuerst am Gerät vorbeibewegt:

1 S7: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschalten werden?
 2 B: Mhm.
 3 S7: Weil ... gleichzeitig is es ja nur, wenn von dem Betrachter aus ...
 4 B: Mhm.
 5 S7: ... die Positionen der Fernseher genau in der Mitte is ...
 6 B: Mhm.
 7 S7: ... also der Winkel quasi is, ... muss gleich groß sein.
 8 B: Mhm.
 9 S7: Und ... wenn sich das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) jetzt bewegt, dann verändert
 10 sich ja ... die ...
 11 B: Mhm.
 12 S7: ... dieser Winkel.
 13 B: Mhm.
 14 S7: Also würde von ... dem Betrachter, also von dem Raumschiff A ... (6 Sekunden Pause;
 15 Anm.) ... entweder der Fernseher 1, oder der Fernseher 2 zuerst eingeschalten werden
 16 und nicht gleichzeitig.
 17 B: Mhm, was würdest du da schätzen, welcher würde denn zuerst eingeschalten werden?
 18 S7: ... Fernseher ... 2(.?)
 19 B: Weil?
 20 S7: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... weil wir uns in die Richtung bewegen und dann is der
 21 Fernseher 2 zuerst dran und dann erst der Fernseher 2.
 22 B: Mhm.
 23 S7: Äh, Fernseher 2 und dann Fernseher 1.

Zitat 481

Ebenso meint sie, dass das Gerät auf Raumschiff B messe, dass F3 und F4 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, da diese unterschiedlich weit vom Fernseher entfernt sind:

1 S7: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschalten werden, ... sondern, dass der Fernseher 3 zuerst
2 eingeschalten wird und dann der Fernseher 4(??)
3 B: Mhm, warum wäre der ... Fernseher 3 zuerst eingeschalten?
4 S7: Weil er näher beim Messgerät steht.
5 B: Ok. Und wenn die Messgeräte ihren Abstand von ... diesen Fernsehern jeweils berücksichtigen
6 und ... alle Daten sammeln über einen Zeitraum hinweg und dann das so rechnen als
7 wären sie ... in einer Position exakt in der Mitte zwischen den Fernsehern. Was würden
8 die Geräte dann feststellen?
9 S7: Fernseher A würde immer noch gleichzeitig.
10 B: Mhm.
11 S7: Ähm, das Messgerät von der Rakete A würde immer noch gleichzeitig sein ... und das
12 Messgerät in Rakete 2 müsste in der Mitte stehen.
13 B: Mhm.
14 S7: Weil, damit die Entfernung gleich is, weil so ... misst entweder die Fernseher hinterein-
15 ander, oder nebeneinanderstehen und nicht ... voreinander.
16 B: Aber es (das Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) könnte ja seine Entfernung berücksichtigen
17 und das einrechnen.
18 S7: Ja aber ... trotzdem is die Länge zwischen ... Fernseher, also, in der Abbildungen
19 zwischen dem Messgerät und Fernseher 4 länger als die ... Länge zwischen Fernseher
20 3(??)

Zitat 482

Es ist schwer eine Aussage über die Vorstellung von Schülerin 7 von Gleichzeitigkeit zu machen, da sie in ihrer Argumentation Effekte der Lichtlaufzeit nicht vernachlässigt. Der weitere Gesprächsverlauf legt nahe, von einem absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff auszugehen, jedoch hat sie ansatzweise eine Vorstellung davon, dass es keinen absoluten Zeitbegriff gibt.

Schülerin 8 meint, nach einem Hinweis, dass die Lichtlaufzeit von den Messgeräten mitberücksichtigt werden kann, dass beide Geräte das gleiche Ergebnis erhalten:

1 S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... wahrscheinlich wird es anzeigen, dass das was
2 näher is sich früher einschaltet, als das was ... sich davon wet-, wegbewegt(??)
3 B: Mhm. Und was, wenn die ... Messgeräte den Abstand berücksichtigen, wir könnten sie ja
4 auch genauso gut in die Mitte stellen ...
5 S8: Mhm.
6 B: ... wär ja möglich und genauso gut können wir das auch einrechnen. Was würde es (das
7 Gerät auf Raumschiff A; Anm.) dann anzeigen?
8 S8: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... dasselbe wie ... das Messgerät auf Raumschiff
9 B, also ..., dass sich die (Fernseher F1 und F2; Anm.) gleichzeitig andrehen?

Zitat 483

Analog dazu sagt sie vorher, dass beide Messgeräte zum gleichen Ergebnis für die Fernseher F3 und F4 gelangen:

1 B: Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B an?
2 S8: ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... dasselbe(??)

Zitat 484

Schülerin 8 hat einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff.

Schüler 9 sagt zunächst, nach einem Hinweis, dass die Lichtlaufzeit von den Geräten berücksichtigt werden kann, voraus, dass das Gerät auf Raumschiff A misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S9: Ähm, das Gerät auf Raumschiff A ... also, auf Raumschiff B wird die Gleichzeitigkeit*
2 *gemessen ... und auf Raumschiff ... B haben wir natürlich eine Verzögerung der Signale.*
3 *B: Und was, wenn wir die ... Abstände zu den Fernsehern und die ...*
4 *S9: Genau, gleich machen.*
5 *B: ... Signallaufzeiten berücksichtigen würden?*
6 *S9: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., also, wenn wir's einrechnen würden, dann müssten*
7 *wir eigentlich die genau gleiche ... Zeit für beide Fernseher bekommen ... wenn sie auch*
8 *wirklich gleichzeitig eingeschaltet werden ... ja.*

Zitat 485

Er macht eine analoge Vorhersage für die Frage zu den Fernsehern F3 und F4, drückt jedoch seine Zweifel an seiner ersten Antwort aus und spricht die Behandlung der Relativität der Gleichzeitigkeit im Unterricht an:

- 1 *S9: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... das Gerät auf Raumschiff B ... (3 Sekunden Pause;*
2 *Anm.) ..., mmm, ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ..., wenn das Gerät auf ... A ...*
3 *misst, dass sie gleichzeitig sind, ... dann das Gerät auf Raumschiff B ... (11 Sekunden*
4 *Pause; Anm.) ..., dann zeigt das Gerät auf Raumschiff ... B, auch, dass sie gleichzeitig*
5 *... sind ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... was keinen Sinn macht ... weil, we-, wenn*
6 *ich davon ausgeh', dass das, was ich beim Letzen gesagt hab' richtig is ... dann müsst'*
7 *ich jetzt sagen auf B, ... ähm, ... auf B findet, also, auf B wird auch Gleichzeitigkeit*
8 *gemessen. Ähm ..., aber ich bin mir nicht sicher, ob das, was ich, ob das Letzte stimmt,*
9 *was ich gesagt hab' ...*
10 *B: Mhm.*
11 *S9: ... ähm, weil ich weiß, wir haben das gemacht in Bezug auf das und Gleichzeitigkeit, also,*
12 *dass für das eine Raumschiff ..., ähm, die einen sagen ..., wir schalten das gleichzeitig*
13 *ein, äh, wir haben das beim Lichtstrahl gemacht, der in zwei Richtungen gesendet wird,*
14 *glaub' ich, und die anderen sagen, hey, ihr habt's g'schummelt, ähm, ... des ..., das*
15 *is gar nicht gleichzeitig ... demnach, rein intuitiv, würd' ich wieder sagen, es is, ähm,*
16 *gleichzeitig ...*

Zitat 486

Er setzt fort, indem er seine intuitive Antwort als logisch falsch bezeichnet:

- 1 *S9: ... aber rein logisch, von dem was ich jetzt ... weiß, kann's nicht gleichzeitig sein, also*
2 *B müsste sagen, nein, das is nicht gleichzeitig.*
3 *B: Und dann im Fall vorher (bei den Fernsehern F1 und F2; Anm.)?*
4 *S9: Eigentlich genau das Gleiche. Also, wenn ich so drüber nachdenke, müsste A wieder*
5 *sagen, ähm, B war nicht gleichzei-, also, es war nicht gleichzeitig, was auf Raumschiff B*
6 *passiert is.*

Zitat 487

Schüler 9 hat zwar intuitiv einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff, weiß jedoch, dass dieser falsch ist, und es wird deutlich, dass er die Vorstellung, dass Gleichzeitigkeit relativ ist zwar als kontraintuitiv, aber als logisch ansieht.

Schülerin 10 missversteht die Frage zunächst und meint dann, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

- 1 *S10: ... ebenfalls, ob sie gleichzeitig eingeschaltet werden(?.?)*
- 2 *B: Und würde es anzeigen sie werden gleichzeitig eingeschaltet, oder nicht?*
- 3 *S10: ... wenn sie gleichzeitig eingeschaltet werden, dann schon, äh, und wenn nicht, dann*
- 4 *nicht.*

Zitat 488

Als Ursache für einen Unterschied sieht sie einen Messfehler an:

- 1 *S10: Ähm, dass sich beide Körper, also Raumschiffe bewegen und es, ähm, beeinflusst diese*
- 2 *Messgeräte vielleicht?*
- 3 *B: Mhm.*
- 4 *S10: Also, auf Raumschiff A, mein' ich jetzt.*

Zitat 489

Sie meint auch, dass das Gerät auf Raumschiff B messe, ob F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden, missversteht diese Frage also ebenfalls und bezeichnet dieses Messgerät als genauer, da es sich im gleichen Raumschiff wie die Fernseher befindet:

- 1 *S10: ... ähm, auch, ob ... sie sich gleichzeitig ein ... schalten, aber ich glaub', das wär'*
- 2 *dann genauer, weil ...*
- 3 *B: Mhm.*
- 4 *S10: ... das befindet sich, also dieses Messgerät befindet sich ebenfalls auf Raumschiff B.*

Zitat 490

Trotz des Missverständnisses bei der zweiten Frage ist klar, dass Schülerin 10 einen absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff hat. Andere Ergebnisse könnte sie nur durch Messfehler erklären.

Schüler 11 gelangt, nachdem er lange über die Auswirkung der Lichtlaufzeit nachdenkt und zunächst meint, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden, zu der Überzeugung, dass es dies unabhängig von seinen Abständen zu den Fernsehern nicht feststellen würde:

- 1 *S11: Wird das mit Licht ... übertragen?*
- 2 *B: Die Messung an sich ist nicht wichtig, weil Effekte ...*
- 3 *S11: Ja, nein, es is aber nicht das ... Zeitverhältnis ...*
- 4 *B: ... werden einberechnet.*
- 5 *S11: ... der k-Faktor, im Sinne, also der, der k-Faktor hier, äh, merkbar is, weil wir ein*
- 6 *Drittel der Lichtgeschwindigkeit fahren, also 33 Prozent ...*
- 7 *B: Mhm.*
- 8 *S11: ... da spüren wir schon einen Unterschied in der Zeit ...*
- 9 *B: Mhm.*

10 S11: ... und sie hier, wenn ich, ich kann's mir leichter mit Lichtstrahlen vorstellen ...
 11 B: Ja.
 12 S11: ... ähm hier ein Lichtstrahl, hier ... also der Weg von dem hier is kürzer als von dem
 13 ...
 14 B: Mhm.
 15 S11: ... von F1 ...
 16 B: Äh, wenn wir ...
 17 S11: (unverständlich)
 18 B: ... wenn wir das Gerät in die Mitte stellen würden?
 19 S11: Ähm ... dann würd' es gleichzeit- ... wenn wir das Gerät in die Mitte stellen würden
 20 ...
 21 B: Kann man ja machen. ... es liegt dann da in der Mitte.
 22 S11: ... es ist dann gleichzeitig. ... äh, das is dasselbe mit dem Blitz, wenn man sich's
 23 vorstellen kann ...
 24 B: Mhm.
 25 S11: Wenn man den da sieht und da ein Blitz einschlägt und da ...
 26 B: Mhm.
 27 S11: und da ein (unverständlich) is so, ... is derselbe Abstand, sollte es dann gleichzeitig
 28 passieren ...
 29 B: Ok, weil, wir könnten ja auch den Abstand einfach einrechnen und dann hätten wir ja ...
 30 die Situation ja erzeugt.
 31 S11: Nein, es bewegt sich. Es kann ... nein, der Raumschiff A bewegt sich, es is nicht
 32 gleichzeitig.
 33 B: Auch wenn's (das Messgerät) in der Mitte stehen würde?
 34 S11: Ja.

Zitat 491

Genauso beurteilt er, nach einem erneuten kurzen Gespräch über die Lichtlaufzeit, die Situation, in der das Gerät auf Raumschiff A misst, dass F3 und F4 auf Raumschiff B gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 S11: Ähm, F3 wird ...
 2 B: Auch wenn's in der Mitte stehen würde, kann man sich wieder vorstellen.
 3 S11: F3 wird zuerst vorge-, äh, F3 zu-, zuerst eingeschalten und dann F4.
 4 B: Und warum?
 5 S11: Weil hier das ... Signal, also, wenn ich's mir wieder mit dem Licht vorstell', man
 6 kann sich's auch über die Zeit vorstellen, für mich ist das komplizierter, ähm, einfach,
 7 sozusagen mit diesen, diesen Pendellichtuhren. Ich hab, äh, ich wechsel mich ab mit der
 8 Vorstellung, aber grad stell ich mir das einfach so vor, ähm, das eben F3 ... ah, einen
 9 läng-, äh, kürzeren Weg ...
 10 B: Äh, wir könnten ja wieder beide (Messgeräte; Anm.) jeweils in die Mitte stellen ...
 11 S11: Ja.
 12 B: Und dann wird das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) ja immer noch anzeigen, die
 13 werden gleichzeitig eingeschaltet ...
 14 S11: Mhm.
 15 B: ... was würde dann das Gerät hier (auf Raumschiff B; Anm.) anzeigen?
 16 S11: Wenn das Gerät (auf Raumschiff B; Anm.) hier (gleich weit von beiden Fernsehern
 17 entfernt) steht?
 18 B: Ja.
 19 S11: Das Gerät (auf Raumschiff B; Anm.) steht hier, ähm, das (Gerät auf Raumschiff A;
 20 Anm.) zeigt an es is gleichzeitig, ... wenn das hier (Gerät auf Raumschiff B; Anm.)

21 gleichzeitig is, dann is irgendwas falsch. Weil das, das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.)
 22 steht auch hier (gleich weit von beiden Fernsehern entfernt; Anm.)?
 23 B: Ja wir könnten das ja auch in die Mitte, sodass die Wege (von beiden Fernsehern zum
 24 Messgerät; Anm.) gleich lang sind stellen.
 25 S11: Nein es wird noch immer ... es wird, F3 wird noch immer zuerst eingeschaltet werden.
 26 B: Mhm. Auch wenn der Abstand gleich wäre?
 27 S11: Ja.
 28 B: Und warum wäre das so?
 29 S11: Hm, weil wir ja wieder die Verschiebung haben.
 30 B: Welche Verschiebung?
 31 S11: Naja, das hier (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) wird beschleunigt ...
 32 B: Naja es beschl-, wird nicht beschleunigt.
 33 S11: ... also nicht, äh, beschleunigt, es, es bewegt sich ...
 34 B: Ja.
 35 S11: ... ähm, das heißt wir haben, haben, hier diese, eben diese Verschiebung ...
 36 B: Mhm.
 37 S11: ... von ... ich, ich sag jetzt nicht mit Licht, weil wenn ich's mir so opt-, visuell vorstell',
 38 dann kann man natürlich auch sagen man stellt das Ding (Messgerät; Anm.) in die Mitte
 39 ...
 40 B: Ja.
 41 S11: Aber hier, hier wird ja die Zeit verschoben ...
 42 B: Mhm.
 43 S11: ... äh, ... und die Zeit is verschoben, das hier zeigt nicht die ... ja.
 44 B: Und sind sie dann jetzt gleichzeitig eingeschaltet worden, oder nicht?
 45 S11: Nein.
 46 B: Aber das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) sagt ja sie sind gleichzeitig eingeschaltet
 47 worden.
 48 S11: Ja aber es is aber die Verschiebung.
 49 B: Mhm. Ok, also würdest du sagen, dass dieser Messwert (das Gerät auf Raumschiff A;
 50 Anm.) eigentlich falsch wäre.
 51 S11: Aus dem Sicht dieses Systems (des Raumschiffs B; Anm.) ja.
 52 B: Und aus Sicht dieses Systems (des Raumschiffs A; Anm.)?
 53 S11: Nein.
 54 B: Das heißt der (das Gerät auf Raumschiff A; Anm.) könnte sagen sind gleichzeitig einge-
 55 schaltet worden und der (das Gerät auf Raumschiff B; Anm.) nicht ...
 56 S11: Ja.
 57 B: ... und hätten beide recht, oder hätte jemand unrecht?
 58 S11: Es hätten ... beide recht aus ihrer Sicht.

Zitat 492

Schüler 11 denkt zwar zunächst jedes Mal an Effekte, die durch die Lichtlaufzeit zustandekommen, gelangt jedoch dann zum richtigen Schluss und wendet insbesondere das Relativitätsprinzip korrekt an. Ihm ist klar, dass Gleichzeitigkeit ein relativer Begriff ist.

Schülerin 12 meint, nach einem Hinweis, dass Effekte der Lichtlaufzeit von den Messgeräten berücksichtigt werden können, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass zuerst F2 eingeschalten wird?
 2 B: Und warum wäre das so?

3 S12: Ähm, ... weil es zuerst an F2 vorbeifliegt(.?)
 4 B: Mhm. Was, wenn die Messgeräte ihre Positionen ..., ihre Abstände von den Fernsehern
 5 und die Lichtlaufzeit ... einrechnen ... die Daten über einen längeren Zeitraum hinweg
 6 sammeln und dann auswerten? Was würde das Gerät auf Raumschiff A dann anzeigen?
 7 S12: Dass sich beide gleichzeitig einschalten(.?)

Zitat 493

Für das Ergebnis der Messung des Geräts auf Raumschiff B sagt sie vorher, dass angezeigt würde, dass F3 und F4 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... mmm, ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass
 2 ... F ... drei schneller, nein ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ..., mhm (lacht), ... (8
 3 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass F4 sich schneller einschaltet?
 4 B: Und warum wäre das so?
 5 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., ähm, ... da aus Sichtpunkt von A ... es (das
 6 Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) zuerst an F4 und an F3 vorbeikommt und wenn sie
 7 (unverständlich), wobei, wenn sich zuerst F4 einschaltet ... es danach erst sieht, wann
 8 ich F3 einschaltet, das heißt, es weiß nicht, ob F3 davor schon eingeschaltet war, oder
 9 nicht.
 10 B: Mhm. Was wäre, wenn die Messgeräte wieder die Daten über einen Zeitraum sammeln,
 11 dann auswerten und die ... Positionen und Abstände berücksichtigen?
 12 S12: ..., ähm, ... dann würden sie ... herausfinden, dass F ..., dass sich die beiden Fern-
 13 seher ... zu unterschiedlichen Zeitpunkten einschalten?
 14 B: Mhm. Wie gesagt, das Gerät auf Raumschiff A zeigt, dass sie gleichzeitig eingeschalt-
 15 tet werden. Was würde, unter der Voraussetzung, dass man ... die ganzen Abstände
 16 berücksichtigt, dann das Gerät auf B ... anzeigen?
 17 S12: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass sie sich unterschiedlich einschalten?
 18 B: Und warum?
 19 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., weil, weil A nicht weiß ... (3 Sekunden Pause;
 20 Anm.) ..., ob das ..., ob der andere Fernseher schon eingeschaltet war, bevor es am
 21 ersten Fernseher vorbeifliegt.

Zitat 494

Die Antworten von Schülerin 12 machen klar, dass sie Gleichzeitigkeit als etwas Absolutes ansieht. Die Ursache für die verschiedenen Messergebnisse bei der zweiten Frage sieht sie offenbar in einem Messfehler bzw. in der Unzulänglichkeit der Messgeräte. Sie hat offenbar Schwierigkeiten damit, perfekte Messgeräte in Gedankenexperimenten zu akzeptieren und den Messprozess als Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung zu sehen.

Schülerin 13 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A messe, dass F1 und F2 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden:

1 S13: Ähm, ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... das würde ..., glaub' ich, ... anzeigen, dass
 2 die ... Fernseher, oder Geräte, auf Raumschiff B nicht gleichzeitig eingeschaltet werden,
 3 weil es sich eben mit einer so großen Geschwindigkeit fortbewegt, ... dass, sozusagen,
 4 die ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... die Aktionen, die mit den Fernsehern passieren
 5 nicht gleichzeitig stattfinden, sondern ... hintereinander wahrgenommen werden ...
 6 B: Mhm.
 7 S13: ... weil es sich eben vorbeibewegt.

8 *B: Ok. Warum werden sie da ... dann hintereinander wahr- ... -genommen, bei einer ...*
9 *größeren Geschwindigkeit?*
10 *S13: Ähm ... weil ... wegen der Zeitdilatation? Ich weiß nicht, haben wir das ... gelernt,*
11 *... ja wegen, also, dass sich die Zeit ... in, dass die Zeit in ander-, in bewegten Bezugs-*
12 *systemen ... langsamer vergeht als in ruhenden Bezugssystemen ...*
13 *B: Mhm.*
14 *S13: ... glaub' ich und ... für mich würd' das dann mehr Sinn machen, dass, wenn halt ...*
15 *das Raumschiff hier vor-, sich vorbeibewegt ...*
16 *B: Mhm.*
17 *S13: ... und Raumschiff B ruhend is, bzw., halt, ... A sich relativ zu B bewegt, dass sich die*
18 *Fernseher halt nicht gleichzeitig einschalten ...*
19 *B: Ok.*
20 *S13: ... weil, ja.*

Zitat 495

Offenbar bereitet es ihr Schwierigkeiten, dass Raumschiff B als bewegt betrachtet wird, da dann die Zeit auf Raumschiff A langsamer vergehen würde. Hier ist ihr wohl nicht klar, dass die Rollen von A und B aufgrund des Relativitätsprinzips austauschbar sind. Sie ergänzt noch, dass das Messergebnis von der Wahl des Bezugssystems abhängt:

1 *S13: ... mm ... es kommt eben auf, auf ... die Perspektive an, aus welchem Bezugssystem*
2 *man das betrachtet.*
3 *B: Mhm.*
4 *S13: Deswegen kann man kein fix ... äh, keine ... fixe Meinung ... dazu sagen, haben ...*
5 *ja.*

Zitat 496

Analog dazu meint sie, dass das Gerät auf Raumschiff B messe, dass F3 und F4 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, da die Zeit in beiden Bezugssystemen verschieden ver-
gehe:

1 *S13: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... mmm ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ich ...*
2 *also zu dem, was ich jetzt gesagt hab', zu dem anderen ... Beispiel müssen sie sich nicht*
3 *gleichzeitig an- ... -schalten, wenn ... das jetzt ... bzw., hm. Mit welcher Geschwindig-*
4 *keit bewegt sich das? Noch immer ...*
5 *B: 100.000 km/s.*
6 *S13: Ok. ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... ich, hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich*
7 *glaub' da müssen sie sich nicht gleichzeitig ... einschalten, weil eben die Zeit in beiden*
8 *Bezugsbys-, Bezugssystemen anders vergeht.*
9 *B: Mhm.*
10 *S13: Ja.*
11 *B: Und ... haben sie sich jetzt gleichzeitig eingeschaltet, oder nicht, in der Situation?*
12 *S13: Das kommt auf ... das Bezugssystem an, aus dem man es betrachtet.*

Zitat 497

Schülerin 13 hat zwar zunächst Schwierigkeiten damit, zu sehen, dass sie auch Raumschiff B als ruhend betrachten kann und verwendet nicht direkt die Relativität der Gleichzeitigkeit als Grundlage ihrer Argumentation, es ist ihr jedoch klar, dass Gleichzeitigkeit in beiden Systemen verschieden ist. Insbesondere versteht sie, dass Zeit nicht absolut ist. Anschließend wendet sie das Relativitätsprinzip korrekt an, indem sie sagt, dass es auf die

Wahl des Bezugssystems ankommt, ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht.

7.3.1.3 Reaktionen der Schüler auf die Relativität der Gleichzeitigkeit

Zehn der 13 Schüler wurde mit der Relativität der Gleichzeitigkeit konfrontiert. Die restlichen drei Schüler waren in ihrer Argumentation so sicher, dass eine Konfrontation nicht nötig schien. Drei der konfrontierten Schüler akzeptierten die Relativität der Gleichzeitigkeit problemlos.

Schülerin 1 kann sich die Relativität der Gleichzeitigkeit nur durch die Lichtlaufzeit oder einen Messfehler erklären:

- 1 *S1: ... hm, vielleicht aufgrund vom Abstand ..., dass, ähm, das, halt, ... auch wenn's kein*
2 *Messfehler is, aber, dass halt einfach ... unterschiedlich ... ankommt vom Signal her(?.)*
3 *B: Mhm. Tatsächlich können die Abstände eingerechnet werden und berücksichtigt werden*
4 *von den Messgeräten und trotzdem kommen sie zu verschiedenen Ergebnissen.*
5 *S1: ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht*
6 *einfach, weil's A später registriert, wie B.*

Zitat 498

Schüler 2 ist überrascht, da er davon überzeugt war, dass ein Unterschied durch die verschiedenen Abstände der Fernseher von den Messgeräten und die Lichtlaufzeit zustandekommt:

- 1 *S2: ... ziemlich verwunderlich, weil, es geht ja, ich dachte es geht ja eigentlich um die*
2 *Abstände, die jetzt das Problem sind, aber ... scheinbar doch nicht.*

Zitat 499

Schülerin 3 findet die Relativität der Gleichzeitigkeit überraschend und würde gerne wissen, wie es zu dieser kommt:

- 1 *S3: (lacht) ja, wie geht das? (lacht) ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... wenn das anzeigt,*
2 *dass diese ... gleichzeitig ... angehen und das zeigt aber nicht an, obwohl's eh auf dem*
3 *Raumschiff is ...*
4 *B: Mhm. Und genauso auch in der Situation, wenn das Gerät hier (auf Raumschiff B; Anm.)*
5 *anzeigt F1 und F2 werden gleichzeitig eingeschaltet, dann würde das (Gerät auf Raum-*
6 *schiff A; Anm.) auf keinen Fall anzeigen, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.*
7 *S3: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... da bin ich raus. (lacht)*
8 *B: Ok. (lacht) Würdest du sagen, das is überraschend?*
9 *S3: Ja, es is überraschend, aber, ... es is ...*

Zitat 500

Schüler 5 meint, dass die Relativität der Gleichzeitigkeit keinen Sinn ergebe:

- 1 *S5: Ähm ... ergibt jetzt für mich so keinen Sinn.*

Zitat 501

Schülerin 6 meint, dass sie die Relativität der Gleichzeitigkeit gelernt habe, aber nicht erklären könne:

1 S6: ... ja, also das hab' ich so auch gelernt (lacht), also ich hätt's mir gedacht, aber ... ja,
 2 ich könnt es jetzt nicht erklären so, warum's so is.

Zitat 502

Es ist bemerkenswert, dass sie die Relativität der Gleichzeitigkeit anwendet und akzeptiert, ohne diese vollinhaltlich zu verstehen.

Schülerin 7 fragt zunächst, ob es sich um einen Fakt handelt und denkt dann wieder über Effekte der Lichtlaufzeit nach. Anschließend findet sie keine Erklärung, denkt jedoch an die Zeitdilatation:

1 S7: Ist das ein Fakt, oder wir, nehmen wir das an?
 2 B: Das is ein Fakt.
 3 S7: ... (14 Sekunden Pause; Anm.) ... weiß ich nicht, ähm ...
 4 B: Mhm.
 5 S7: ... ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... aber die Längen sind auch die Läng-, also
 6 die (Fernseher F3 und F4; Anm.) schalten sich gleichzeitig ein, aber das Messgerät (auf
 7 Raumschiff B; Anm.) misst das nicht?
 8 B: Also dieses Messgerät (auf Raumschiff A; Anm.) würde, wenn's da in der Mitte auch wär
 9 bestimmen, die (Fernseher F3 und F4; Anm.) sind gleichzeitig eingeschaltet und dieses
 10 (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) selbst wenn's in der Mitte wär, würde dann messen,
 11 die sind nicht gleichzeitig eingeschaltet.
 12 S7: Bewegt sich Raumschiff B? Nein, oder?
 13 B: Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B.
 14 S7: ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... weiß ich immer noch nicht, keine Ahnung.
 15 B: Mhm. Und was könnte die Ursache vielleicht sein?
 16 S7: Zeitdili-, dile-, diletation, dielation, keine Ahnung.
 17 B: Ok.
 18 S7: Aber weiß ich nicht, keine Ahnung.

Zitat 503

Schülerin 7 hat offenbar Schwierigkeiten damit, die Relativität der Gleichzeitigkeit zu akzeptieren.

Schülerin 8 ist unsicher, meint aber, sich an ein Gesetz der Gleichzeitigkeit zu erinnern. Anschließend wendet sie das Relativitätsprinzip korrekt an und erkennt, dass die Messungen aus beiden Systemen gleichwertig sind:

1 S8: ... das is jetzt blöd. (lacht)
 2 B: (lacht)
 3 S8: ... ähm ..., dass sie (unverständlich) sicher nicht ... da war ja irgendein Gesetz der
 4 Gleichzeitigkeit, spielt's darauf hinaus? ... wahrscheinlich. (lacht) aber wie ging das
 5 nochmal, irgendwie, irgendwas is tatsächlich nur dann gleichzeitig, ... wenn ... (3 Se-
 6 kunden Pause; Anm.) ... wahrscheinlich wird's beeinflusst durch die Geschwindigkeit das
 7 Messgerät das auf Raumschiff A ...
 8 B: Mhm. Wie meinst du „beeinflusst durch die Geschwindigkeit“?
 9 S8: Weil sich das Messgerät auf Raumschiff A ... davon wegbewegt, also wenn man davon
 10 ausgeht, dass es mit 100.000 km/s nur sich bewegt ...
 11 B: Mhm.

12 S8: ... weil's eben nicht an selber ... Ort und Stelle ...
 13 B: Mhm.
 14 S8: ... und Zeit ... sich andreht, also dadurch is es nicht gleichzeitig.(?)
 15 B: Würdest du dann sagen es gibt hier eine richtige und eine falsche Messung?
 16 S8: ... ich glaube jede rel-, Messung is richtig für ... den Punkt ... an dem sie messen.(?)

Zitat 504

Schüler 9 erfasst die Bedeutung der Relativität der Gleichzeitigkeit und spricht auch die Zeitdilatation an. Er stellt klar, dass Gleichzeitigkeit immer vom Bezugssystem abhängt:

1 S9: Ähm, also, wir haben die Zeit- ... -dilatation gemacht ... und ... Zeit is ja ein Konzept
 2 das wir haben ... und es ... Zeit vergeht verschieden ... ähm ... in relativ zueinander
 3 bewegten Systemen, das heißt, wir haben zum Beispiel einen Astronaut irgendwo hinschi-
 4 cken ... ähm, altert der, langsamer, als die Leute auf der Erde ... demnach, rein intuitiv
 5 macht's wieder keinen Sinn, weil wir, wir kennen's halt nicht, Relativitätstheorie is halt
 6 außerhalb unserer ... Wahrnehmung, Großteils, aber ... rein logisch nachgedacht, doch,
 7 also, macht's, macht Sinn.
 8 B: Mhm. Und würdest du dann sagen, die sind jetzt gleichzeitig eingeschaltet worden, oder
 9 nicht?
 10 S9: ... also, gleichzeitig, gleichzeitig is ein schwerer Begriff, gleichzeitig ... is immer im
 11 Bezug auf ein ... höherliegendes System, wenn ich sage, hier auf der Erde, wir schalten
 12 beide gleichzeitig unsere Handys ein, dann is Bezu-, im Bezug auf das Zeitsystem unserer
 13 ... Erde. Das Problem im ... Weltall is, wir haben kein ... , ähm, keinen Zeit-, wie nennt
 14 man das, nicht Zeitäther, sondern, dass man kein, kein ruhendes System ... außerhalb,
 15 äh, an de-, an dem wir uns richten können und demnach können wir Gleichzeitigkeit gar
 16 nicht feststellen und deshalb würd' ich (unverständlich) sagen ... gleichzeitig ... is gar
 17 keine Frage, die man sich stellen kann, weil, wir können's sowieso nicht bestimmen.
 18 B: Mhm. Und würdest du sagen, die ... Erde wär' so ein ruhendes System?
 19 S9: Ich glaub', die Erde is ein System, das wir als ruhendes System nehmen, weil's einfach
 20 praktisch is ..., aber sie ist kein ruhendes System, es is einfach nur eine Vereinfachung
 21 für uns.

Zitat 505

Es wird deutlich, dass er das Relativitätsprinzip und die Relativität der Gleichzeitigkeit und die Zeitdilatation gut in sein Denken integriert hat. Obwohl er diese Effekte als kontraintuitiv bezeichnet, kann er sie logisch nachvollziehen. Insbesondere betrachtet er auch nicht die Erde als ausgezeichnetes System.

Schülerin 10 ist überzeugt davon, dass einer der Messwerte falsch ist:

1 S10: Ähm, ja, also ich glaub' eines muss davon stimmen, ...
 2 B: Mhm.
 3 S10: ... ähm, und es hängt glaub' ich davon ab, wie ... diese zwei Körper zueinander stehen
 4 ...
 5 B: Mhm.
 6 S10: ... und wie sie sich relativ zueinander bewegen.
 7 B: Mhm.
 8 S10: Ähm, und ja.

Zitat 506

Schülerin 10 akzeptiert die Relativität der Gleichzeitigkeit nicht. Es ist unklar, ob sie einen Messfehler aufgrund der Relativbewegung als Ursache sieht, oder das Relativitätsprinzip nicht anwendet. Ihre vorangegangenen Antworten deuten auf ersteres hin.

Schülerin 12 meint zwar, dass keines der Messergebnisse falsch sei, aus ihrer Argumentation wird jedoch deutlich, dass sie die Unzulänglichkeit des Geräts auf Raumschiff A als Ursache für das Ergebnis sieht:

- 1 *S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ..., ähm, ja, also ..., irgendwie verbind' ich das Ganze*
2 *mit Perspektive ...*
3 *B: Mhm.*
4 *S12: ..., weil, ... wenn ich etwas nicht sehe, weiß ich auch nicht ..., ob ... es jetzt ein-*
5 *geschaltet is, oder nicht und das is bei A ja der Fall, weil da ... si-, sich zuerst nicht*
6 *sicher is, bzw. zuerst nicht weiß, ob das andere Gerät eingeschaltet is, oder nicht.*
7 *B: Mhm.*
8 *S12: Deshalb ... ja, versteh' ich. Wüрд' ..., wüрд' Sinn ergeben.*
9 *B: Ok. Und, äh, welches der beiden Geräte, würdest du sagen, misst da richtig?*
10 *S12: Mmm, ich glaub' ... da ... gibt es kein Richtig, oder Falsch, weil es eben darauf an-*
11 *kommt, auf welchem ... Raumschiff man sich befindet ... und ... das is ... einfach*
12 *eine andere Messung, also keine Messung is falsch.*

Zitat 507

Es bleibt unklar, weshalb sie keine der Messungen als falsch ansieht, obwohl sie die Relativität der Gleichzeitigkeit damit begründet, dass das Gerät auf Raumschiff A einen der Fernseher nicht sehen könne.

7.3.2. Zusammenfassung

Von den 13 befragten Schülern sprechen elf Effekte der Lichtlaufzeit an, davon nehmen zehn den Hinweis, dass diese Effekte von den Messgeräten berücksichtigt werden können, an. Eine Schülerin bezieht diese Effekte in alle ihre Überlegungen mit ein.

Fünf der 13 Schüler sehen Gleichzeitigkeit als relativ und vom Bezugssystem abhängig an. Von den anderen acht begründen vier die Relativität der Gleichzeitigkeit mit Messfehlern, der Signallaufzeit, oder unzulänglichen Messgeräten. Zwei Schüler akzeptieren die Relativität der Gleichzeitigkeit, obwohl sie zuvor unterschiedliche Ergebnisse der beiden Messgeräte über die Lichtlaufzeit begründet haben. Eine Schülerin, die die Relativität der Gleichzeitigkeit anwendet, merkt an, dass sie diese nicht begründen könne. Eine Schülerin, die meint, dass die Messgeräte dasselbe messen würden, akzeptiert bei Konfrontation die Relativität der Gleichzeitigkeit und erinnert sich an die Behandlung dieser im Unterricht. Ein Schüler ist überrascht von der Relativität der Gleichzeitigkeit und zeigt sonst keine Reaktion.

Vier Schüler stellen einen Bezug zur Zeitdilatation her, drei davon wenden die Relativität der Gleichzeitigkeit in der gegebenen Situation richtig an. Das deutet darauf hin, dass der Effekt der Zeitdilatation den Schülern besser in Erinnerung geblieben ist als die

Relativität der Gleichzeitigkeit, da sie diese kaum explizit nennen.

7.4. Relativität von Raum und Längen

Die Fragen, die den Leitfaden für das Gespräch zur Relativität von Raum und Längen bildeten und die jeweils verfolgten Ziele finden sich in Abschnitt 6.4.

7.4.1. Auswertung der Interviews zur Relativität von Raum und Längen

7.4.1.1 Schülervorstellungen zu Raum und Längen

Von den 13 befragten Schülern sprechen zwölf von selbst an, dass das relativ zur Bowlingbahn bewegte Gerät eine andere Länge misst. Davon sagen sechs, dass es sich in allen Fällen um eine Kontraktion handelt, vier gehen in einer der Situationen von einem größeren Messwert für die Länge aus und eine spricht in einem der Fälle von einem gleichen Messwert, und im anderen von einem größeren. Eine Schülerin meint damit nur Messungenauigkeiten.

Schülerin 1 ist überzeugt davon, dass das relativ zur Bowlingbahn bewegte Messgerät die gleiche Länge feststellt wie jenes, das sich auf dem gleichen Raumschiff wie die Bahn befindet:

- 1 *S1: 18,3 m(.?)*
2 *B: Und was, wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet ...*
3 *S1: Auch 18,3 m ...*
4 *B: ... jetzt zeigt das Gerät auf Raumschiff A 18,3 m an, was würde dann das Gerät auf B*
5 *messen?*
6 *S1: Auch 18, 3(.?)*

Zitat 508

Sie bleibt auch nach der Besprechung der Längenkontraktion dabei und sagt voraus, dass das Messgerät auf dem Raumschiff die gleiche Länge misst wie das Gerät auf der Erde:

- 1 *S1: Ja sollte eigentlich auch 18,3 m anzeigen.*

Zitat 509

Schülerin 1 sieht Längen als absolut an. Sie lässt sich darin auch nicht durch eine Besprechung der Längenkontraktion verunsichern.

Schüler 2 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A eine größere Länge für die Bowlingbahn anzeigt als das Gerät auf Raumschiff A:

- 1 *S2: Es werden auf jeden Fall keine 18,3 m sein. Hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich*
2 *würd' fast sagen, sie zeigt einen lä-, sie zeigt ... längere Strecke an.*

Zitat 510

Wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet, sagt er vorher, dass das Gerät auf Raumschiff B eine kürzere Länge anzeigt:

1 *S2: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... (lacht) es werden wieder nicht die 18,3 m sein ... (7*
 2 *Sekunden Pause; Anm.) ... bin nicht so sicher, ich würd' fast sagen ... kürz-, eine ...*
 3 *kürzere Länge.*

Zitat 511

Er wendet die Information, dass das relativ zur Bahn bewegte Gerät immer eine kürzere Länge misst, sofort korrekt auf den Fall, dass sich die Bahn auf der Erde befindet, an:

1 *S2: ... wahrscheinlich wieder eine kürzere, weil sich, also weil's ... sich das Raumschiff*
 2 *relativ zur Bowlingbahn bewegt.*

Zitat 512

Schüler 2 wendet die Längenkontraktion an, tut dies jedoch zunächst so, dass der Effekt asymmetrisch wäre und somit im Widerspruch zum Relativitätsprinzip stünde.

Schülerin 3 sagt vorher, dass das Gerät auf Raumschiff B eine kürzere Länge für die Bahn auf Raumschiff A misst:

1 *S3: ... eine, eine verkürzte Länge(.?)*

Zitat 513

Analog antwortet sie auch, wenn sich die Bahn auf Raumschiff B befindet und ihre Länge von Raumschiff A aus gemessen wird:

1 *S3: ... und das (Raumschiff B; Anm.) is jetzt das bewegende? ... (7 Sekunden Pause; Anm.)*
 2 *... ich glaub' auch eine verkürzte.*

Zitat 514

Sie meint auch, dass das Gerät auf dem Raumschiff eine verkürzte Länge für die Bahn auf der Erde misst:

1 *S3: ... ich glaub' eine verkürzte, hm ...*

Zitat 515

Schülerin 3 wendet die Längenkontraktion in allen Fällen korrekt an.

Schüler 4 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A eine größere Länge für die Bahn auf Raumschiff B messe:

1 *S4: Eine längere ... Länge(.?) Das war das mit dieser Längen ... kontrak-, ich weiß jetzt*
 2 *nicht wie der Fachbegriff heißt, aber ... der ... sagt etwas Anderes auf jeden Fall.*

Zitat 516

Für den Messwert des Geräts auf Raumschiff B für die Länge der Bahn auf Raumschiff A sagt er einen geringeren Wert voraus:

1 *S4: Eine ... kürzere? Also, auf jeden Fall wieder eine andere, ja.*

Zitat 517

S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, wieder ... eine andere? Eine kürzere?

Zitat 518

Schüler 5 meint, dass jedes Mal das relativ zur Bahn bewegte Gerät eine kürzere Länge feststelle:

Er sagt auch voraus, dass das Gerät auf dem Raumschiff eine andere Länge für die Bahn auf der Erde misst als das Gerät auf der Erde:

Zitat 520

Schülerin 6 meint, dass immer das relativ zur Bowlingbahn bewegte Messgerät eine kürzere Länge feststelle:

Zitat 521

1 S8: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... etwas ... Längeres? Oder Nein etwas ... Kürzeres.
 2 B: Mhm. Und wie kommt es dazu?
 3 S8: Weil ... von dem ... ruhenden System aus gesehen werden ... die ... Strecke, oder
 4 Längen im bewegten System verkürzt angesehen.
 5 B: Ok. Was, wenn wir jetzt die Bowlingbahn auf Raumschiff A platzieren? Das Gerät auf
 6 Raumschiff A misst jetzt eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Was zeigt dann
 7 das Gerät auf Raumschiff B für diese Länge an?
 8 S8: ... hm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... wenn's da verkürzt war, als da ... (4 Sekunden
 9 Pause; Anm.) ... kann's dasselbe wieder sein? ... is das möglich? Weil eigentlich bewegt
 10 sich dem, das Messgerät in B ja immer noch ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich
 11 glaub' es wird weiterhin verkürzt wahrnehmen.

Zitat 526

Ebenso antwortet sie auch in dem Fall, dass sich die Bahn auf der Erde befindet:

1 S8: ... eine verkürzte.

Zitat 527

Schülerin 8 wendet die Längenkontraktion in allen Fällen korrekt an. Interessant ist, dass sie meint, die Längen werden als verkürzt „angesehen“, oder „wahrgenommen“. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass sie die Längenkontraktion als scheinbaren Effekt ansieht.

Schüler 9 meint, dass das relativ zur Bahn bewegte Gerät jeweils eine kürzere Länge messe:

1 S9: Ähm, also, es gibt ... bei der Relativitätstheorie auch sowas, äh, das nennt man ...
 2 Längenkontraktion. Ähm, auch Längen sind nicht gleich, ähm, in relativ zueinander be-
 3 wegten Systemen ... glaub', ja. Und ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... so, wird's jetzt
 4 kürzer, oder länger ... messen, is die Frage. Ähm, ... das relativ zueinander bewegt
 5 sich, die bewegen sich aneinander vorbei ... rein intuitiv würd' ich demnach sagen ...
 6 es misst eine kürzere Strecke ... ja, also ... das auf Raumschiff A misst eine kürzere
 7 Strecke ... für Raumschiff, also, für die ... Bowlingbahn auf Raumschiff B. Genau.
 8 B: Ok. Was, wenn wir jetzt die Bowlingbahn auf Raumschiff A platzieren und das Gerät auf
 9 Raumschiff A für diese eine Länge von 18,3 m anzeigt? Was zeigt dann das Gerät auf
 10 Raumschiff B an?
 11 S9: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... hatten wir vorhin nicht genau das Gleiche, nur, dass
 12 die Raumschiffe umgedreht sind, praktisch? Demnach ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ...
 13 ah so, nein, die Bowlingbahn hat sich ver-, ah, ok, genau. Ähm, ... (6 Sekunden Pause;
 14 Anm.) ... auf Raumschiff B, also rein nach meiner Logik, weil ... sich beide ja praktisch
 15 ... in die entgegengesetzte Richtung ... bewegen, schrumpft für mich, ähm, die Bowling-
 16 ... -bahn, -bahn praktisch, das heißt, ich würd' wieder sagen, ... die Bowlingbahn ... is
 17 kürzer, also wird als kürzer wahrgenommen, von dem Raumschiff B aus.

Zitat 528

Ebenso meint er, dass das Gerät auf dem Raumschiff eine kürzere Länge für die Bahn auf der Erde messe:

1 *S9: ... ok, also, jetzt ... is das Raumschiff ... relativ zur Erde bewegt ... ähm, ... so Sachen*
2 *wie ... Erdrotation und so lassen wir jetzt einfach ... außer Acht. Ähm, ... (5 Sekunden*
3 *Pause; Anm.) ... überleg' grad ... das müsste man eigentlich direkt ummünzen können*
4 *von ..., also, von dem Beispiel, das wir vorhin hatten ..., ähm, ... weil es geht ja wieder*
5 *um Relativgeschwindigkeit, dann is es egal, ob sich die Erde bewegt, oder Raumschiff A*
6 *bewegt, es geht ... drum, ... was zwischen den beiden passiert ..., ähm, ... demnach*
7 *würd' ich ... genau das gleiche Ergebnis wie vorhin sagen ... die Länge is für das*
8 *Raumschiff ... kürzer, als sie auf der Erde gemessen wird.*

Zitat 529

Schüler 9 wendet die Längenkontraktion in allen Fällen korrekt an.

Schülerin 10 macht zunächst keine konkrete Aussage dazu, welche Länge gemessen würde, meint aber, dass es einen Unterschied gäbe, da das Gerät, das relativ zur Bahn bewegt wird, die Länge nicht so genau bestimmen könne:

1 *S10: Naja, da es vorher gesagt wurde, dass die zwei Geräte nicht übereinstimmen, würd' ich*
2 *sagen ...*
3 *B: Mm, das ist jetzt schon eine neue Situation.*
4 *S10: ... oder ist das is was anderes, oder ...*
5 *B: Ja.*
6 *S10: Ähm, dann würd' ich, ähm ... sagen, dass das wahrscheinlich von Raumschiff A aus*
7 *nicht genau bestimmt werden kann ...*
8 *B: Mhm.*
9 *S10: ... weil, ähm, ein Raumschiff von beiden bewegt sich ...*
10 *B: Mhm.*
11 *S10: ... und da dieses Messgerät sich auf B befindet und quasi mit dieser Bowlingbahn sich*
12 *bewegt, ist es leichter ... zu messen, wie lang das auch ist, aber wenn sich zum Beispiel*
13 *B bewegt, dann is' A ... das, dann kann es natürlich nicht so genau sein, weil es in*
14 *Bewegung steht, oder ... in Bewegung ist.*
15 *B: Und wenn wir eine Bowlingbahn auf Raumschiff A betrachten und das Gerät auf Raum-*
16 *schiff A bestimmt für dieses eine Länge von 18,3 m ... wie wird dann ... äh, welche*
17 *Länge wird dann vom Gerät auf Raumschiff B angezeigt ... für die Bowlingbahn?*
18 *S10: Mm ich glaub' es is' so wie ... vorher, weil jetzt bewegt sich B auch noch trotzdem mit*
19 *100.000 km/s und dann wär' halt (das Messgerät auf Raumschiff; Anm.) A genauer als*
20 *B(.?)*

Zitat 530

Genauso argumentiert sie auch in dem Fall, dass sich die Bahn auf der Erde befindet. Hier meint sie auf Nachfrage, dass das Gerät auf dem Raumschiff bei perfekter Messung den gleichen Wert wie jenes auf der Erde messe:

1 *S10: Ähm, da ... hier dieser ruhende Körper quasi unsere Erde is und sich das Raumschiff*
2 *bewegt würd' ich sagen, dass es wieder da ungenau ist wo sich der Körper bewegt.*
3 *B: Ok.*
4 *S10: Ähm und hier, wenn es auf der Erde liegt, dann is es genauer.*
5 *B: Mhm.*
6 *S10: Also hier würd's 18,3 m messen und da ... wahrscheinlich irgendwas Kürzeres, oder*
7 *irgendwas Längeres.*
8 *B: Mhm, und wenn die Läng-, äh, wenn die Messung absolut perfekt wäre, was würde es (das*
9 *Messgerät auf dem Raumschiff; Anm.) dann messen, für diese Länge?*

- 10 *S10: Genauso 18,3 ...*
 11 *B: Mhm.*
 12 *S10: ... Meter(.?)*

Zitat 531

Schülerin 10 wendet die Längenkontraktion nicht an. Sie sieht Längen als absolut an und meint, dass ein relativ zur Bahn bewegtes Gerät aufgrund von Messungenauigkeiten eine andere Länge feststelle.

Schüler 11 sagt, dass das Gerät auf Raumschiff A eine kleinere Länge für die Bahn auf Raumschiff B messe:

- 1 *S11: Keine Ahnung, 14(.?) 14 Meter, 16 Meter ...*
 2 *B: So, länger kürzer ...*
 3 *S11: Ja, kürzer.*

Zitat 532

Im umgekehrten Fall sagt er voraus, dass das Gerät auf Raumschiff B eine größere Länge für die Bahn auf Raumschiff A messe:

- 1 *B: ... das reicht völlig. Ok, und wenn sich die Bahn auf Raumschiff A befindet und das Gerät*
 2 *auf Raumschiff eine Länge von 18,3 m misst für die Bowlingbahn ...*
 3 *S11: Dann wird sie länger.*
 4 *B: ... was stellt dann das Gerät auf Raumschiff B für diese Länge fest?*
 5 *S11: Sie sollt' länger werden.*
 6 *B: Ok.*
 7 *S11: Aus Sicht ... warten ähm, ... es ist glei-, nein es muss länger werden, weil, B nimmt*
 8 *an es wir-, es ist gleich, es is gleich groß ...*
 9 *B: Ok.*
 10 *S11: ... das heißt die, seine Umwelt wird klein-, äh, größer, so.*

Zitat 533

Wenn sich die Bahn auf der Erde befindet, meint er, das Gerät auf dem Raumschiff messe eine kleinere Länge:

- 1 *S11: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... sie muss kleiner werden.*

Zitat 534

Schüler 11 wendet die Längenkontraktion zunächst asymmetrisch an, sodass sie im Widerspruch zum Relativitätsprinzip stünde.

Schülerin 12 meint zunächst, dass das Gerät auf Raumschiff A eine kürzere Länge für die Bahn auf Raumschiff B messe, korrigiert sich jedoch und sagt eine größere Länge voraus:

- 1 *S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... eine ..., eine kürzere Länge.*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S12: Oder, na ..., nein, nein, nein ... hm, eine längere Länge, weil ... die ... Bowlingbahn*
 4 *... für den ganzen ..., für die ganze Länge des Raumschiffs A ... sichtbar is ...*

5 *B: Mhm.*
 6 *S12: ..., sozusagen.*

Zitat 535

Im Gegensatz dazu meint sie, dass das Gerät auf Raumschiff B die gleiche Länge für die Bahn auf Raumschiff A messe wie das dort platzierte Gerät, da Raumschiff A das ruhende System ist:

1 *S12: ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... eine Länge von ... 18,3 m, weil ... sich A im*
 2 *Ruhestand befindet und ... B ... eben die ... korrekte ... Länge der Bowlingbahn ...*
 3 *messen könnte?*
 4 *B: Ok.*
 5 *S12: (lacht)*
 6 *B: Mhm. Und, äh, wie würdest du genau sagen kommt es hier (wenn sich die Bahn auf B*
 7 *befindet; Anm.) dann dazu, dass das Gerät auf A eine ... längere Länge für die Bahn*
 8 *misst?*
 9 *S12: ..., ähm, ... da sich die Bahn ... die ganze Zeit in Sicht- ... -feld von A befindet ...*
 10 *B: Mhm.*
 11 *S12: ... während es, während B vorbeifliegt.*
 12 *B: Ok. Mhm, ... also, das klingt so, als würdest du über einen optischen Effekt reden.*
 13 *S12: Mmm, mhm.*

Zitat 536

Sie meint, dass es sich bei der gemessenen größeren Länge, wenn sich die Bahn auf Raumschiff B befindet, um einen optischen Effekt handelt. Ihr Wissen aus dem Gespräch über die Längenkontraktion wendet sie in dem Fall, dass sich die Bahn auf der Erde befindet, gleich richtig an:

1 *S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... eine kürzere Länge? (lacht)*
 2 *B: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ..., weil?*
 3 *S12: Ähm, ... weil ... Sie mir vorher gesagt haben, dass es eine kürzere Länge is. (lacht)*
 4 *B: Ok. Was würdest du denn sonst sagen?*
 5 *S12: Ich ... hätte gesagt, dass es ... die gleiche Länge wäre ...*

Zitat 537

Schülerin 12 sieht Längen offenbar als absolut an. Sie unterscheidet auch zwischen den Fällen, dass sich die Bahn in dem auf der Abbildung als ruhend und dem als bewegt eingezeichneten System befindet, vernachlässigt hier also das Relativitätsprinzip. Insbesondere meint sie, dass die Länge der „ruhenden“ Bahn von beiden Geräten genau bestimmt werden könne, die der „bewegten“ jedoch nur vom mitbewegten Gerät.

Schülerin 13 meint, dass das Gerät auf Raumschiff A eine andere Länge für die Bahn auf Raumschiff B messe, ist jedoch unsicher, ob diese kleiner, oder größer wäre:

1 *S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ... auf jeden Fall nicht Acht-, also, glaub' ich,*
 2 *nicht 18,3 m, weil ... sich eben Raumschiff B, relativ zu Raumschiff A, bewegt ... und*
 3 *... - wie heißt das? - Längenkontradiktion, oder sowas, haben wir gelernt, dass sich eben*
 4 *... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... abhängig vom Standpunkt, aus dem man es sieht,*
 5 *die Längen ... verkürzen, oder verlängern, bzw. verschieben ... und deswegen würd' ich*

6 sagen, dass aus dem, aus der Perspektive von Raumschiff A die Bowlingbahn ... hm,
7 auf, ich weiß nicht, ob länger, oder kürzer, aber 18,3 m nicht ... lang ist.
8 B: Ok.
9 S13: Gemessen.
10 B: Was wäre, was wär dein Tipp eigentlich, länger, oder kürzer?
11 S13: Mmm, ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich würd', ich würd' aus ... Intuition sagen
12 kürzer, weil sich das Raumschiff B eben schnell vorbeibewegt.

Zitat 538

In dem Fall, dass sich die Bahn auf Raumschiff A befindet, ist sie unsicher, ob eine kleinere, oder größere Länge vom Gerät auf Raumschiff B gemessen wird, intuitiv meint sie jedoch, dass die Länge kleiner wäre:

1 S13: ... mmm ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' ... (5 Sekunden Pause; Anm.)
2 ... ich, also, ich glaub' wieder nicht 18,3 m, sondern ... die Länge verschiebt sich eben
3 wieder ...
4 B: Mhm.
5 S13: ... und ... da ... da jetzt halt A, sozusagen, ruhend is und B bewegt ... würd' ich
6 sagen, dass die Länge ... wieder verkürzt is, aber ... ich weiß nicht ... weil vorher
7 war ja A, sozusagen, war A ruhend und die Bowlingbahn auf den bewegten, im bewegten
8 Bezugssystem, deswegen ... ich glaub', dass die Länge nicht gleich bleibt, aber ich weiß
9 nicht, ob kürzer, oder länger wieder.
10 B: Und deine Intuition?
11 S13: Mmm ... würd' wieder sagen kürzer.

Zitat 539

Wenn sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet, sagt sie ebenso voraus, dass das Gerät auf dem Raumschiff eine kleinere Länge misst:

1 S13: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ... ich, also ... wieder nicht 18,3 m, sondern
2 ..., ich würd' sagen wieder eine verkürzte Länge, weil ... wir haben ja vorher auch ...
3 Raumschiff A gehabt, dass sich soz-, dass sozusagen das ruhende System war und da jetzt
4 halt ... die Erde, die das ruhende System is ...
5 B: Mhm.
6 S13: ..., sozusagen, deswegen würd' ich genau dasselbe wieder sagen, dass die ... Bowling-
7 bahn verkürzt is für ... das Messgerät im ... auf dem Raumschiff.

Zitat 540

Schülerin 13 wendet die Längenkontraktion in allen Fällen korrekt an, ist jedoch meist unsicher, ob die Strecke kürzer, oder länger wäre.

7.4.1.2 Reaktion der Schüler auf die Relativität von Raum und Längen und Aussagen zu dieser

Von den 13 befragten Schülern reagieren zwölf auf die Längenkontraktion und deren Symmetrie, oder äußern sich zu deren Ursache. Von diesen wird nur bei drei Schülern deutlich, dass sie die Längenkontraktion nicht als Folge eines Messfehlers sehen.

Schülerin 1 meint, bei Konfrontation mit der Längenkontraktion, dass das relativ zur Bahn bewegte Gerät diese anders „wahrnehme“:

- 1 *S1: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht aufgrund ... der Bewegung, weil, Raumschiff-*
 2 *fe bewegen sich ja ..., dass, einfach ... der eine das bisschen verkürzt wahrnimmt(.?)*

Zitat 541

Genauso argumentiert sie auch mit der Längenkontraktion in dem Fall, dass sich die Bahn auf der Erde befindet:

- 1 *S1: ... hm, das nimmt's einfach wieder anders wahr.*

Zitat 542

Offenbar denkt Schülerin 1, dass es um einen Messfehler geht. Ihre Aussage, dass die Länge „ein bisschen“ verkürzt wahrgenommen werde, zeigt, dass ihr nicht bewusst ist, dass Verkürzungen bis zu einer Länge von knapp über Null möglich sind.

Schüler 2 erklärt das Zustandekommen der von ihm genannten größeren Länge durch die Messung:

- 1 *S2: Weil der ... Raumschiff B bewegt sich ... weg von Raumschiff A ... (3 Sekunden Pause;*
 2 *Anm.) ... somit wird vielleicht irgendwie die Geschwindigkeit dazugerechnet, vom Gerät*
 3 *... oder es zieht's einfach irgendwie in die Länge, weil das ... sich wegbewegt(.?)*

Zitat 543

Ebenso begründet er die von ihm genannte Verkürzung, wenn sich die Bahn auf Raumschiff A befindet:

- 1 *S2: Weil, irgendwie, indem es (das Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) irgendwie vorbei-*
 2 *fliegt ... staucht die Mess-, das vorbeifliegende Mess- ... staucht das vorbeifliegende*
 3 *Messgeräts die Länge irgendwie ein?*

Zitat 544

Bei Konfrontation mit der Symmetrie der Längenkontraktion wird deutlich, dass er einen Messfehler als Ursache für die Längenkontraktion sieht:

- 1 *S2: ... es is halt ... allgemein ziemlich lustig, weil für uns is die Bahn halt einfach 18,3 m*
 2 *lang.*
 3 *B: Mhm.*
 4 *S2: ... und, dass da jetzt immer einfach was Kürzeres anzeigt ...*
 5 *B. Mhm.*
 6 *S2: ... halt, komisch, auch wenn's das andere noch, noch berücksichtigt.*

Zitat 545

Schüler 2 sieht Längen demnach als absolute Größen an, obwohl er zuvor die Längenkontraktion - wenn auch asymmetrisch - angewendet hat. Er begründet die Längenkontraktion mit äußeren Bedingungen und findet es seltsam, dass sie auch unter Berücksichtigung dieser auftritt.

Schülerin 3 begründet die von ihr angewendete Längenkontraktion mit einem Messproblem:

1 *S3: Naja, weil, also, das (Raumschiff B; Anm.) bewegt sich halt mit einer Geschwindigkeit*
 2 *und somit, wenn's ... hier anfängt zu messen, aber sich so schnell bewegt, dass es ...*
 3 *diese Bahn sich dann ... verkürzt und der andere Messpunkt ... zum Beispiel hier wäre,*
 4 *oder so(.?)*

5 *B: Mhm.*

6 *S3: Und das ist dann einfach ... die Länge verkürzt aufgrund der Geschwindigkeit von ... B.*

Zitat 546

Für Schülerin 3 ist die Längenkontraktion die Folge eines Messfehlers infolge der hohen Relativgeschwindigkeit.

Schüler 4 ist offenbar überrascht von der Symmetrie der Längenkontraktion, nimmt diese aber einfach zur Kenntnis:

1 *B: Das heißt hier (wenn sich die Bahn auf B befindet; Anm.) würde das Gerät auf A etwas*
 2 *Kürzeres als ...*

3 *S4: Also, ...*

4 *B: ... 18,3 anzeigen und hier (wenn sich die Bahn auf A befindet) würde das Gerät auf B*

5 *...*

6 *S4: ... etwas Längeres.*

7 *B: ... etwas Kürzeres ... als 18, 3 anzeigen.*

8 *S4: Mhm.*

9 *B: Was sagst du dazu?*

10 *S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... is halt so. (lacht)*

Zitat 547

Er findet keine Erklärung für die Längenkontraktion, macht jedoch deutlich, dass die gemessene Länge der Bahn vom gewählten Bezugssystem abhängt:

1 *S4: ... ähm, ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... weil ... sich das Raumschiff mit ... einer*
 2 *sehr sehr hohen Geschwindigkeit fortbewegt und es deswegen aus ihrem Bezugssystem ...*
 3 *eben die Bahn kürzer einfach gemessen wird.*

Zitat 548

Schüler 4 sieht Längen offenbar nicht als absolut an. Es bleibt jedoch eine Unsicherheit, da er seine Aussage zunächst nur auf die Messung bezieht und unklar ist, ob ihm klar ist, dass die Länge tatsächlich nur über diese definiert ist.

Schüler 5 erklärt die von ihm korrekt angewendete Längenkontraktion über die Zeitdilatation:

1 *S5: Ähm ... also dadurch, dass ... quasi ein, ein ... ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.)*
 2 *... ein Unterschied in ... der, der Zeit ist ... zwischen den zwei Objekten, ähm und*
 3 *sich ... die Geschwindigkeit ja selbst nicht verändert, äh, muss ich, logischerweise, die*
 4 *Länge, oder die Strecke verändern.*

5 *B: Wie meinst du, ein Unterschied in der Zeit?*

6 *S5: Ähm, es ist ja die, das bewegte Objekt hat im System des unbewegten Objekts, Objekts,*
 7 *weniger Zeit, ähm, is, es is weniger Zeit verstrichen ...*

8 *B: Mhm.*

9 S5: ... ähm, als in dem ruhenden System.
 10 B: Ok. Um die Länge zu bestimmen, müsste man ja gleichzeitig Anfangs- und Endpunkt
 11 bestimmen ... und vorher hast du gemeint, wenn etwas im Raumschiff A gleichzeitig ist,
 12 dann wär's, auch im Raumschiff B gleichzeitig. ... hätte das irgendwie einen Einfluss
 13 auf diese Längenbestimmung?
 14 S5: Ähm ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... ich denke schon, ja. ... (3 Sekunden Pause;
 15 Anm.) ... ähm ... (13 Sekunden Pause; Anm.) ... also, ja, wenn man, wenn man
 16 wieder eben ... die, also die zwei Punkte misst, als Anfangspunkt und Endpunkt der
 17 Bowlingbahn und dann da die Strecke nimmt dann schon, ja.

Zitat 549

Seine Erklärung ist zulässig, passt jedoch nicht dazu, dass er zuvor von einem absoluten Gleichzeitigkeitsbegriff ausgegangen war. Konfrontiert damit ändert er offenbar seine Meinung zur Gleichzeitigkeit:

1 S5: ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ja wenn ... aber ... (4 Sekunden Pause;
 2 Anm.) ... aber es wird dann ... nicht gleichzeitig, weil es is ja, es hat ja, es gibt ja dann
 3 einen Unterschied ...
 4 B: Mhm.
 5 S5: ... ähm, von Anfangspunkt und Endpunkt ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... für das
 6 Raumschiff B dann.
 7 B: Ok, also zwar würde hier (auf Raumschiff A; Anm.) das (Messgerät auf Raumschiff A;
 8 Anm.) gleichzeitig bestimmen und hier (auf Raumschiff B; Anm.) würde es (das Mess-
 9 gerät auf Raumschiff B; Anm.) nicht gleichzeitig bestimmen ...
 10 S5. Ja.

Zitat 550

Schüler 5 sieht Längen als vom Bezugssystem abhängige Größe an und findet sogar eine Erklärung für diese. Seine Schwierigkeiten mit dem Begriff der Gleichzeitigkeit zeigen, dass er die Zusammenhänge der einzelnen relativistischen Effekte noch nicht vollständig durchdrungen hat.

Schülerin 6 wendet die Längenkontraktion zwar korrekt an, findet jedoch keine Ursache für diese:

1 B: Und was wäre die Ursache dafür?
 2 S6: ... ähm, ... (17 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, ich weiß es nicht (lacht).

Zitat 551

Schülerin 7 nimmt die Symmetrie der Längenkontraktion zur Kenntnis:

1 S7: Wird wahrscheinlich stimmen. (lacht)

Zitat 552

Ihre Behandlung der Situation, in der sich die Bahn auf der Erde befindet und ihre Reaktion auf die Korrektur zeigen, dass sie die Symmetrie jedoch nicht durchdrungen hat:

1 S7: Dann is da andersrum, also bei den anderen Raketen auch andersrum.

Zitat 553

Offenbar denkt sie nun, dass das Gerät auf Raumschiff A eine größere Länge für die Bahn auf Raumschiff B messe und das Gerät auf Raumschiff B eine kleinere für die auf Raumschiff A. Sie akzeptiert die Längenkontraktion, versteht jedoch nicht ihre Symmetrie.

Schüler 9 erklärt die Längenkontraktion über die Zeitdilatation und erkennt, dass diese beiden Effekte immer gemeinsam auftreten müssen:

- 1 *S9: ... ähm, wie kommt es zu der Verkürzung ... ähm, ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... ich*
2 *weiß nicht, vielleicht, also, ... man könnt's vielleicht erklären mit ... ganz ... normaler*
3 *... Formel, von wegen v ist gleich s durch t . Ähm, ... Geschwindigkeit ist ja konstant,*
4 *also wir haben 100.000, äh, Kilometer ... pro ... Sekunde ... Relativgeschwindigkeit,*
5 *und ... jetzt hat sich praktisch unsere ... Zeit verändert, das haben wir vorher schon*
6 *festgestellt, Zeitdilatation. Demnach, ähm, ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... demnach*
7 *muss sich die Länge ... genauso kontrahieren um ... praktisch das auszugleichen, was*
8 *von der Zeitdilatation verändert wurde, wenn Sie wissen, was ich mein', ... ähm ...,*
9 *dass bei der Geschwindigkeit wieder das ... Gleiche rauskommt, in Anführungsstrichen,*
10 *... das heißt ..., also, ... die Logik in meinem Kopf war, als wir's gelernt haben,*
11 *es, dass Zeitdilatation und Längenkontraktion sich praktisch ausgleichen, und somit die*
12 *Geschwindigkeit weiterhin gleichbleibt. Ähm, demnach macht's ... Sinn für mich, dass*
13 *... da Längenkontraktion stattfindet, weil sonst, äh, wenn es nicht so wär, würd' der ...,*
14 *der Astronaut im Raumschiff ... also, wenn man jetzt sagen würde, der Rau-, Astronaut*
15 *im Raumschiff, ähm, der irgendwie weit fliegt, ähm, dem ... wurde befohlen mit einer*
16 *genau gleichen Geschwindigkeit, äh, Wörter aufzuschreiben, ja. Dann würde der in der ...*
17 *gleichen Zeit praktisch mehr Wörter schaffen ..., ähm, wenn keine Längenkontraktion*
18 *vorbei, vorhanden ist, wenn die Längenkontraktion vorhanden ist ... muss er praktisch das*
19 *Wort auch lä-, also, es ist, braucht er mehr Platz um das Wort zu schreiben und demnach*
20 *gleich sich das aus mit der ... Zeitdilatation, wenn Sie wissen, was ich mein', das ist*
21 *sehr abstrakt jetzt, ja, ...*
22 *B: Mhm.*
23 *S9: ... ähm, aber so würd's für mich Sinn machen. Sie gleichen sich einfach aus, Zeitdilatation*
24 *und Längenkontraktion, genau.*

Zitat 554

Schülerin 10 hätte von selbst nicht erkannt, dass in allen Fällen das bewegte Gerät eine kleinere Länge misst und führt den Unterschied auf einen Messfehler zurück:

- 1 *S10: Ähm, also, ich hätt' jetzt nicht, also ich wär' jetzt nicht drauf gekommen, dass es kürzer*
2 *is', aber ich ... versteh' schon, dass das unterschiedlich ist und nicht beide Geräte das*
3 *Gleiche anzeigen.*
4 *B: Und was wäre deiner Meinung nach die Ursache?*
5 *S10: Ähm, Bewegung generell.*
6 *B: Und gäbe es da jetzt objektiv betrachtet einen richtigen und einen falschen Wert?*
7 *S10: Ähm, ich glaub' ... das was, wo das Messgerät wirklich mit dieser Bowlingbahn sich*
8 *auf einem Raumschiff befindet.*
9 *B: Mhm, das wäre ...*
10 *S10: Richtig.*
11 *B: Ok.*
12 *S10: Oder genauer.*

Zitat 555

Sie bestätigt dies bei der Situation, in der sich die Bahn auf der Erde befindet:

1 *S10: Ja eben, dass es halt, falls es sich bewegt, ähm, jetzt eben relativ zu ... dieser Erde,*
2 *dass es halt dann ... eine ... nicht so genaue Länge anzeigt.*

Zitat 556

Schülerin 10 sieht Messfehler als Ursache für die Längenkontraktion.

Schüler 11 ist zunächst von der Symmetrie der Längenkontraktion überrascht, meint aber schließlich, dass diese Sinn ergebe:

1 *S11: Auch eine kürzere?!*
2 *B: ... als das relativ zur Bahn ruhende.*
3 *S11: Das was sich bewegt misst die kürzere Länge(.?)*
4 *B: Mhm.*
5 *S11: Das heißt ... warten ... sehr interessant (lacht). Hallo. Ähm ... das hier (Gerät auf*
6 *Raumschiff B; Anm.) misst eine kürzere ...*
7 *B: Genau.*
8 *S11: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ok, das heißt ich hab's genau umgekehrt eigentlich*
9 *gesagt, bei beiden ...*
10 *B: In dem Fall (wenn sich die Bahn auf A befindet; Anm.) aber nur, weil, hier (wenn sich*
11 *die Bahn auf B befindet; Anm.), misst das Gerät auf Raumschiff A, das bewegt sich ja*
12 *relativ zur Bahn ...*
13 *S11: Jaja.*
14 *B: ... bzw. die Bahn relativ zum Gerät, das misst was Kürzeres, das hast du auch gesagt.*
15 *Hier (wenn sich die Bahn auf A befindet; Anm.) bewegt sich das Gerät auf Raumschiff*
16 *B relativ zur Bahn, also misst das was Kürzeres.*
17 *S11: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja macht Sinn.*
18 *B: Ok.*
19 *S11: Das is, das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) is in der, im ruhenden System und das*
20 *hier (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) bewegt sich schneller, das heißt es misst es kürzer,*
21 *ja es ergibt Sinn.*

Zitat 557

Schülerin 12 ist davon überrascht, dass jedes Mal eine Verkürzung der Strecke gemessen wird und denkt offenbar immer noch an die Auswirkungen eines optischen Effekts:

1 *S12: ..., ähm, ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... (lacht) ... (20 Sekunden Pause; Anm.)*
2 *... ich bin mir nicht ganz sicher, wieso ... es ... bei beiden Messungen kürzer ist ...*
3 *weil es ..., für mich eben durch dieses Optische mehr Sinn ergeben würde, dass es beim*
4 *einen längeren is ...*
5 *B: Mhm.*
6 *S12: ... aber, ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub', ich würd's auch nicht weiter*
7 *hinterfragen. (lacht)*

Zitat 558

Schülerin 12 sieht einen Messfehler als Ursache für die Längenkontraktion an.

Schülerin 13 erklärt die Längenkontraktion dadurch, dass das Messgerät die Länge der Bahn aufgrund der Relativbewegung nicht richtig erfassen kann:

1 *S13: Weil ich mir ... bildlich irgendwie ... vorstell, so, dass sich das Messgerät, halt,*
 2 *während es sich vorbeibewegt, dass es nicht die ganze Länge so erfassen kann, wie's nor-*
 3 *malerweise wäre, sondern, weil sich's eben so schnell vorbeibewegt nur ein ..., sozusagen,*
 4 *eine Verstauchung heißt das glaub' ich, also es is kürzer.*

Zitat 559

Sie meint auch, dass sie zwar durch den Unterricht wisse, dass es eine Längenkontraktion gäbe, sie diese aber nicht intuitiv finde:

1 *S13: ... mmm ..., also, jetzt macht's, also, es ... durch den Unterricht, den wir hatten,*
 2 *macht's irgendwie ein bisserl mehr Sinn ... äh, mit den ... Längenverschiebungen, die*
 3 *wir gelernt haben, ... aber ... so rein intuitiv hätt ich's, glaub' ich, nicht gewusst, bzw.*
 4 *... ich hätt' nicht die Geschwindigkeit ... mit einbezogen in meine ... Überlegungen.*
 5 *B: Meinst du intuitiv, bevor du den Unterricht hattest ...*
 6 *S13: Ja.*
 7 *B: ... und ... vom jetzigen Standpunkt?*
 8 *S13: Ja. Genau, also, ich, vor'm Unterricht hätt ich's ... entweder mit Glück intuitiv gewusst,*
 9 *oder nicht gewusst. (lacht)*

Zitat 560

Schülerin 13 sieht offenbar einen Messfehler als Ursache für die Längenkontraktion an.

7.4.1.3 Relativitätsprinzip und das erdfeste System im Kontext der Relativität von Raum und Längen

Von den 13 befragten Schülern wenden acht das Relativitätsprinzip im Kontext der Längenkontraktion richtig an und meinen, dass es keinen absoluten Wert für die Länge der Bowlingbahn gibt. Eine Schülerin sieht das erdfeste System als ausgezeichnetes Bezugssystem an.

Schülerin 1 ist überzeugt davon, dass es einen richtigen Wert für die Länge der Bowlingbahn gibt und dass man diesen bestimmen könne, indem man ihre Länge auf der Erde abmesse:

1 *S1: ... ja, auf jeden Fall ...*
 2 *B: Mhm.*
 3 *S1: ..., weil, wenn man die Bowlingbahn auf die Erde zurückholt und abmessen würde (lacht)*
 4 *...*
 5 *B: Mhm.*
 6 *S1: ... dann ... hat sie ja auch ... die Länge, die sie hätte und je nachdem, welches von*
 7 *beiden dann ... die Länge hat, wird richtig messen, aber ich vermute jetzt eher A ...*
 8 *B: Mhm.*
 9 *S1: ... aus dem Grund, weil's näher bei der Bowlingbahn is.*

Zitat 561

In dem Fall, dass sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet identifiziert sie auch sofort den Messwert des dortigen Geräts als richtig:

1 *S1: Ich hätt' jetz g'sagt das auf der Erde is das richtige.*

Zitat 562

Schülerin 1 sieht zunächst keines der beiden Raumschiffe als ausgezeichnetes System an, da sie meint, die Länge könne nur durch eine Messung in einem absoluten System bestimmt werden. Für diese Situation ist ihre Vorstellung des Relativitätsprinzips also ausreichend, jedoch sieht sie das erdfeste System ganz klar als ausgezeichnetes Bezugssystem an.

Schüler 2 erkennt zwar den Wert des relativ zur Bahn bewegten Geräts als für dieses System richtig an, meint jedoch, dass der Wert des Geräts, das sich im gleichen Raumschiff wie die Bahn befindet, der absolute wäre:

- 1 *S2: Nein, weil für jeden is ... der eigene Wert der richtige.*
2 *B: Mhm, welche ... Länge hat denn die Bowlingbahn tatsächlich?*
3 *S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ich würde sagen 18,3 m, aber für ... jetzt zum Beispiel,*
4 *in dem Beispiel für Raumschiff B hat's tatsächlich weniger.*
5 *B: Ok, also meinst du es gibt keinen ... einen absoluten Wert?*
6 *S2: ... ich würd' jetzt mal sagen 18,3 m, weil absoluter Wert müsste auch der sein, ... wenn*
7 *man daneben steht und ...*
8 *B: Mhm.*
9 *S2: ... es is ...*

Zitat 563

Wenn sich die Bahn auf der Erde befindet, meint er, dass es keinen richtigen Wert gäbe, jedoch der Wert des Geräts auf der Erde als „richtiger“ angesehen werde:

- 1 *S2: Nein. Also wir würden wieder den Wert auf der Erde als richtiger ansehen, aber es gibt*
2 *keinen richtigen.*

Zitat 564

Schüler 2 sieht den Wert, der im System der Bahn gemessen wird, als absolut an und dieses System somit als ausgezeichnet. Dennoch behauptet er gleichzeitig, dass es keinen richtigen Wert gäbe. Es wirkt so, als wäre ihm nicht bewusst, was mit richtig gemeint ist.

Schülerin 3 bezeichnet die Messergebnisse der Geräte auf beiden Raumschiffen als richtig:

- 1 *S3: ... hm, naja, es kommt drauf an, was ... man ... Auge vom Betrachter, also wenn man*
2 *auf B is, dann denkt B es is die richtige Messung und wenn man auf A is dann ... denkt*
3 *man A hat die richtige Messung durchgeführt.*
4 *B: Und ... gäb's ... ein objektiv richtigen Wert für die Länge der Bahn?*
5 *S3: ... hm ... ich glaube nicht. (lacht)*
6 *B: Also, du würdest sagen sie haben verschiedene Ergebnisse, aber beide sind richtig?*
7 *S3: Aus der Sicht von ... A, oder B, je nachdem wer es gemessen hat, sind sie richtig, aber*
8 *generell kann man jetzt nicht sagen, wer richtig is, nur aus der Sicht von ... A, oder B,*
9 *glaub' ich.*

Zitat 565

Ebenso argumentiert sie, wenn sich die Bahn auf der Erde befindet:

- 1 *S3: Nein, ... weil, auch wenn, also das Raumschiff bewegt sich ja mit ... einer schnelleren*
2 *Geschwindigkeit, aber ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... trotzdem stimmt der Wert, den*
3 *sie gemessen haben, weil ... wenn die Bahn kürzer is und sie ... bewegen sich aber auch*
4 *schnell, dann sind sie schneller wieder am Ziel, also (lacht) ...*
5 *B: Mhm.*

6 *S3: ... sind ... jeder hat ... aus seiner Sicht recht, würd' ich sagen.*
Zitat 566

Aus ihrer letzten Aussage wird klar, dass sie die Strecke als im System des Raumschiffs tatsächlich verkürzt ansieht. Sie berücksichtigt das Relativitätsprinzip in ihrer Überlegung korrekt.

Schüler 4 stellt klar, dass es keinen absolut gültigen Wert für die Länge der Bowlingbahn gibt:

1 S4: Nein. Wieder ... kommt drauf an aus welchem Bezugssystem man's sieht.
2 B: Und, welche Länge hat dann die Bowlingbahn?
3 S4: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... kommt auch auf's Bezugssystem an, weil man's ...
4 eigentlich nicht genau sagen kann.
5 B: Ok. Äh, wenn du meinst „nicht genau sagen kann“, meinst du, es gibt prinzipiell einen
6 ... absoluten Wert, den wir aber nicht feststellen können?
7 S4: Es gibt keinen absoluten Wert.

Zitat 567

Ebenso argumentiert er in dem Fall, dass sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet:

1 S4: Nein, es kommt auch wieder auf's Bezugssystem ... drauf an.
2 B: Ok. Also würdes-, äh, gibt's ..., kannst du hier sagen ... es gibt, auch theoretisch vielleicht
3 eine ... absolute Länge, die die Bahn hat?
4 S4: ... für jedes einzelne Bezugssystem schon, aber generell nicht.

Zitat 568

Schüler 4 wendet das Relativitätsprinzip auch im Kontext der Längenkontraktion korrekt an. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben bereitet ihm nur die Symmetrie der Kontraktion Schwierigkeiten.

Schüler 5 macht deutlich, dass auch ein äußerer Beobachter keinen absoluten Wert für die Länge der Bowlingbahn erhalten würde, da sein Bezugssystem ebenfalls nicht ausgezeichnet ist:

1 S5: Ähm ... nein, es gibt keinen richtigen oder falschen Wert, weil für ... jeweils die zwei
2 Raumschiffe is‘ ja ihr Bezugssystem quasi das richtige ...
3 B: Mhm.
4 S5: ... ähm, als ... äh, logischen Wert würde man wahrscheinlich den von Raumschiff A
5 nehmen, also dort wo sich die Bowlingbahn befindet ...
6 B: Mhm.
7 S5: Aber so generell, der Wert von Raumschiff B is genau so richtig wie von Raumschiff A.
8 B: Ok. Könnte man irgendwie von außerhalb drauf schauen und einen absolut richtigen Wert
9 bestimmen, für die ... Länge der Bowlingbahn?
10 S5: Äh, nein, weil es wär‘ ja nur wieder quasi ein anderer Wert aus einem anderen Bezugs-
11 system und wieder halt nur ein, auch ein weiterer richtiger Wert.

Zitat 569

Auch wenn sich die Bahn auf der Erde befindet, ändert das für ihn nichts:

1 *S5: Nein, eigentlich wieder nicht. Es ist genau dasselbe ... wie davor mit den zwei Raum-*
2 *schiffen.*

Zitat 570

Schüler 5 wendet das Relativitätsprinzip auch im Kontext der Längenkontraktion richtig an.

Schülerin 6 ist davon überzeugt, dass beide Messergebnisse gleichberechtigt sind:

1 *S6: Also, es gibt keinen richtigen, oder falschen, weil's immer drauf ankommt, von wo man's*
2 *betrachtet.*
3 *B: Mhm, und welche Länge hat jetzt die Bowlingbahn?*
4 *S6: Kommt drauf an von wo man's betrachtet. (lacht)*

Zitat 571

Daran ändert sich für sie auch nichts, wenn sich die Bahn auf der Erde befindet:

1 *S6: Mm, nein, auch nicht, halt ... kommt drauf an, ob man am Raumschiff is, oder auf der*
2 *Erde.*

Zitat 572

Schülerin 6 wendet das Relativitätsprinzip auch im Kontext der Längenkontraktion korrekt an.

Schülerin 7 meint, dass die von beiden Geräten gemessenen Längen exakt sind:

1 *S7: Nein, weil ... von dem bewegten System ist das die exakte Länge, die das misst, nur ...*
2 *im anderen System, also in ... dem Fall jetzt in dem ruhenden System is es halt ... eine*
3 *andere Länge, aber es is trotzdem die exakte Länge.*

Zitat 573

Genauso beurteilt sie auch die Situation, in der sich die Bahn auf der Erde befindet:

1 *S7: Nein.*
2 *B: Ok.*
3 *S7: Is wieder das Gleiche.*
4 *B: Mhm. Und welche Länge hat in diesen ganzen Fällen die Bowlingbahn dann tatsächlich?*
5 *S7: Aus unserer Sicht 18,3 m ...*
6 *B: Mhm.*
7 *S7: ... und aus der Sicht des Raumschiffs ... kürzer.*

Zitat 574

Sie hat allerdings Probleme mit der Symmetrie der Längenkontraktion. In dem Fall, dass sich die Bahn auf Raumschiff A befindet, meint sie, das Gerät auf Raumschiff B messe für diese eine größere Länge, da Raumschiff B das bewegte System sei:

1 *S7: ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... eine längere ... Bowlingbahn(.?) Also, das Messgerät*
2 *B jetzt?*
3 *B: Mhm.*

Schülerin 7 wendet das Relativitätsprinzip im Kontext der Längenkontraktion, abgesehen von der Symmetrie, korrekt an.

Schülerin 8 meint zwar, dass es keinen richtigen und keinen falschen Wert gäbe, bezeichnet aber den vom Gerät, das sich im gleichen System wie die Bahn befindet, als tatsächliche Länge der Bahn:

- 1 S8: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, so richtig, ich weiß nicht, ob man da von
2 richtig und falsch sprechen kann, weil irgendwie hat ja ... man könnte sagen, ... das
3 Messgerät, das die exakte Länge ... auf dem ... wo sich's (die Bowlingbahn; Anm.) halt
4 auch befindet, wahrnimmt, is quasi richtig, weil, ... wir könnten's ja auch abmessen und
5 würden theoretisch auf denselben ... Messwert kommen wie das Messgerät ...
6 B: Mhm.
7 S8: Aber irgendwie hat das andere Messgerät ja trotzdem recht, aus seiner Sicht aus ...
8 B: Mhm.
9 S8: ... oder, von seinem Bezug zum ... zur Bowlingbahn.
10 B: Mhm. Also, welche Länge hat die Bowlingbahn tatsächlich?
11 S8: Wahrscheinlich irgendwie 18,3, oder ... ja.

Zitat 576

Dieser Argumentation folgt sie auch, wenn sich die Bahn auf der Erde befindet:

- 1 S8: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' weiterhin, dass, es is, jeder aus seiner Sicht
2 ... recht hat ...
3 B: Mhm.
4 S8: ..., oder ... ja.
5 B: Und welche Länge hat die Bowlingbahn tatsächlich?
6 S8: ... 18,3 m(.?)

Zitat 577

Schülerin 8 wendet das Relativitätsprinzip zwar oberflächlich korrekt (und auch symmetrisch) an, glaubt jedoch an die Existenz einer von der Messung unabhängigen, absoluten Länge der Bahn. Folglich ist ihr nicht klar, dass Längen nur über die Messung definiert sind und sich somit die Längen in verschiedenen Bezugssystemen tatsächlich unterscheiden.

Schüler 9 erfasst die Bedeutung des Relativitätsprinzips sehr umfassend und erläutert diese:

- 1 S9: Ähm, das is genau das Gleiche, wie bei der Zeitdilatation, ähm, es gibt keinen richtigen
2 und keinen falschen Wert, wir haben kein, ähm, höheres Bezugssystem ...
3 B: Mhm.
4 S9: ... das Einzige, was wir haben, is die Erde als Bezugssystem, in, ... die nehmen wir als
5 Bezugssystem, oder als, als Ruhesystem, in Anführungsstrichen ...
6 B: Mhm.
7 S9: ... obwohl sie das nicht is ...
8 B: Mhm.

9 S9: ... ähm, demnach, nein, es gibt kein ... richtiges System, für jeden is sein eigenes
 10 System richtig ...
 11 B: Mhm.
 12 S9: ... und ... in den meisten Fällen is für jeden auch nur sein eigenes Sy-, System relevant,
 13 das is zum Beispiel im Fall der Erde ... uns interessiert nicht wie Zeit am ... Mars
 14 vergeht, oder so, ...
 15 B: Mhm.
 16 S9: ... also, das ist ... bis jetzt noch nicht wichtig.
 17 B: Und ..., wenn du sagst ... wir haben kein höheres Bezugssystem, meinst du, wir haben
 18 in dieser Situation keines, oder ...
 19 S9: Wir haben generell keines.
 20 B: Mhm.
 21 S9: Es gibt, also, das U-, Universum is von uns als ... unendlich wahrgenommen und ... man
 22 hat ja gemessen, dass es ... noch immer am Expandieren is ..., ähm, ... und wir wissen
 23 nicht, was ... außerhalb, also, wir können uns nicht mal vorstellen, was außerhalb des
 24 Universums is, weil ... für uns muss irgendwas dort sein, aber ... es is nicht irgendwie
 25 so, als wär das ..., keine Ahnung, irgendein, ein Würfel an dem wir uns ... jetzt, äh,
 26 ... orientieren würden, ...
 27 B: Mhm.
 28 S9: ... also, es gibt generell kein ruhendes System im Universum.
 29 B: Mhm. Und welche Länge hat die Bowlingbahn tatsächlich?
 30 S9: ... wie meinst du tatsächlich? Ach so, ach so, hm ... das is natürlich ... (3 Sekunden
 31 Pause; Anm.) ..., also für Raumschiff A hat sie natürlich die ... Länge von, äh, 18,3
 32 m ... und für Raumschiff B dann eine kürzere Länge, dementsprechend ..., ähm, ...,
 33 wobei das dann so eine Frage is ... was man für sinnvoll, als was ..., sie hat für beide
 34 Bezugssys-, also, für beide, beide Raumschiffe hat's eine verschieden Länge, das wissen
 35 wir ..., ähm, ... man muss sich dann wahrscheinlich einfach entscheiden was am Sinn-
 36 vollsten is, ob's sinnvoll is, dass jeder mit seinen eigenen Längen misst ..., oder, ob man
 37 sagt ..., ähm, ... nein, wir nehmen jetzt das Raumschiff A als Bezugssystem für alles
 38 und demnach wird auch alles was in Raumschiff B passiert nach den ... Werten von
 39 Raumschiff A ... berechnet, praktisch. Das heißt, man müsst sich irgendwie einigen, auf
 40 einen Wert, aber ... es gibt kein, ... keine wirkliche Länge.

Zitat 578

Ebenso stellt er in der Situation, dass sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet noch einmal klar, dass auch die Erde kein absolutes Bezugssystem darstellt:

1 S9: Ähm, ... wenn man exakt is, nein, gibt keinen richtigen Wert ...
 2 B: Mhm.
 3 S9: ... für uns ... rein logisch und rein praktisch is der Wert auf der Erde der richtige Wert,
 4 weil das is für uns der relevante Wert. Der Wert vom Raumschiff is ... in ... zumindest
 5 bis jetzt, wir haben noch keine anderen Planeten besiedelt ..., äh, irrelevant.

Zitat 579

Schüler 9 hat eine ausgezeichnete Vorstellung des Relativitätsprinzips und diskutiert sogar die Wahl bestimmter Systeme für verschiedene Situationen aus praktischen Gründen.

Schülerin 10 sieht den Wert des Geräts, das sich auf dem gleichen Raumschiff wie die Bowlingbahn befindet als richtig an:

1 *S10: Ähm, ich glaub' ... das was, wo das Messgerät wirklich mit dieser Bowlingbahn sich*
2 *auf einem Raumschiff befindet.*
3 *B: Mhm, das wäre ...*
4 *S10: Richtig.*
5 *B: Ok.*
6 *S10: Oder genauer.*

Zitat 580

Die Wahl des Bezugssystems für die Betrachtung der Situation bezeichnet sie als beliebig und sieht insbesondere auch die Erde nicht als ausgezeichnetes System an:

1 *S10: Ähm, könnte man glaub' ich schon, es ... hängt aber davon ab wo sich diese Bowlingbahn*
2 *befindet dann(?.) Also wenn wir jetzt draufschauen wie lang das is ...*
3 *B: Mhm.*
4 *S10: ... und zum Beispiel das (die Bowlingbahn; Anm.) da drauf (auf dem Raumschiff;*
5 *Anm.) liegt, dann könnten wir auch sagen, dass das (Raumschiff; Anm.) unser ruhender*
6 *Körper is ...*
7 *B: Mhm.*
8 *S10: ... und sich die Erde bewegt(?.) ... ich glaub' es is grundsätzlich egal, also es können*
9 *beide ruhend, oder eben bewegte Körper sein, das hängt nur ... davon ab wo ... man*
10 *sich befindet.*

Zitat 581

Schülerin 10 versteht zwar, dass die Wahl des Bezugssystems beliebig ist, es kann aber keine Aussage darüber getroffen werden, ob sie eine der Längenmessungen (und damit das zugehörige System) als ausgezeichnet betrachten würde, da sie Längen als absolut ansieht.

Schüler 11 meint, dass nicht gesagt werden könne, welcher der Werte richtig und welcher falsch sei:

1 *S11: Also, kann man nicht sagen. ... also, das hier (Raumschiff A; Anm.) is das ruhende*
2 *System aus seiner Sicht, also ...*
3 *B: Mhm.*
4 *S11: ... kann man annehmen, äh, dass es das, aber das hier, es ist kein Richtig, oder Falsch*
5 *...*
6 *B: Ok.*
7 *S11: ... denn das System könnte sich auch bewegen ...*
8 *B: Ja.*
9 *S11: ... im System Raumschiff A.*

Zitat 582

Auch die Erde sieht er nicht als ausgezeichnetes Bezugssystem an:

1 *S11: Kann man nicht sagen.*
2 *B: Gibt's prinzipiell einen richtigen, oder falschen Wert?*
3 *S11: Für uns, für uns auf der Erde is natürlich der Erd-, äh, die Erde immer der richtige*
4 *Wert ...*
5 *B: Mhm.*
6 *S11: ... unter Anführungszeichen, weil's einfach viel einfacher is für uns vorzustellen, die*
7 *Erde is ... bleibt, aber die Erde bewegt, kreist ja auch um die Sonne, die Sonne kreist ja*

8 um whatever, irgendeinen andern Stern und der andere Stern kreist um den Mittel der
 9 Univer-, um den Mittelpunkt des Universums. Wir können nicht sagen, es is ja nichts
 10 in, in Ruhe eigentlich, und es gibt kein ruhendes System. Jetzt, für Vereinfachungszwecke
 11 werden wir wahrscheinlich sagen die Erde is das richtige System, oder die richtige Länge,
 12 aber ...
 13 B: Und könnten wir theoretisch sagen das Raumschiff ruht und die be-, Erde bewegt sich mit
 14 100.000 ...
 15 S11: Ja, das kann man auch sagen.
 16 B: Könnte man, ok.
 17 S11: Ja.
 18 B: Und du würdest generell sagen dann haben, dann sind beide Werte prinzipiell richtig.(?)
 19 S11: Ja richtig aus, aus Sicht des jeweiligen Systems.

Zitat 583

Schüler 11 hat eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips und spricht sogar die aus praktischen Gründen oft getroffene Wahl eines Bezugssystems für eine gegebene Situation an.

Schülerin 12 meint zwar, dass beide Messwerte gleichberechtigt seien, bezeichnet jedoch die vom Gerät im System der Bowlingbahn bestimmte Länge als tatsächliche Länge der Bowlingbahn:

1 S12: ... mmm, nein, ich glaub' das is ... so wie ... bei den Zeitpunkten ...
 2 B: Mhm.
 3 S12: ..., dass es ... einfach ... verschiedene Messungen sind ... und es auch darauf an-
 4 kommt in ... welcher Perspektive man sich gerade befindet.
 5 B: Mhm. Meinst du mit Perspektive jetzt ...
 6 S12: Also ..., ja, welches Raumschiff, auf welch-, also ..., die Messung von welchem Raum-
 7 schiff jetzt ... auf welchem man, auf welchem Raumschiff man sich befindet.
 8 B: Also, du würdest meinen die Wahl des Bezugssystems, aber ...
 9 S12: Ja.
 10 B: ..., jetzt nicht irgendwie die optische Perspektive.
 11 S12: Ja.
 12 B: Ok. ... welche Länge hat dann die Bowlingbahn?
 13 S12: ... hm, ... 18,3 m?

Zitat 584

Genauso antwortet sie auch in dem Fall, dass sich die Bowlingbahn auf der Erde befindet:

1 S12: ... nein, glaub', also, ... glaub' ich auch nicht.
 2 B: Und welche Länge hat hier die Bowlingbahn?
 3 S12: (lacht) auch 18,3 m.

Zitat 585

Schülerin 12 meint zwar, dass beide Werte gleichberechtigt sind, sieht jedoch Werte, die im System der Bahn gemessen werden, als tatsächliche Werte an. Ihr ist offenbar nicht klar, dass die Länge nur über die Messung definiert ist und sich die Längen in verschiedenen Bezugssystem tatsächlich unterscheiden.

Schülerin 13 ist überzeugt davon, dass sich die Längen in den beiden Bezugssystemen unterscheiden:

- 1 *S13: Nein, es kommt wieder auf's Bezugssystem an, aus dem man es sieht.*
2 *B: Und welche Länge hat dann die Bowlingbahn?*
3 *S13: ... für das bewegte Bezugsbys, Bezugssystem das von dem, ... ähm, Messgerät auf*
4 *Raumschiff B und von dem ruhenden Bezugsbys-, ... Bezugssystem die Messung*
5 *des Messgeräts auf Raumschiff A.*

Zitat 586

Daran ändert sich für sie auch nichts, wenn sich die Bahn auf der Erde befindet:

- 1 *S13: ... kommt auf die Perspektive an ...*
2 *B: Ok.*
3 *S13: ... aus dem Bezugssystem.*
4 *B: Könnte rein theoretisch auch ... der ..., das Raumschiff als ruhend und die Erde als,*
5 *relativ dazu, bewegt betrachtet werden?*
6 *S13: ... ja, würd' ich schon sagen, ... also, ... wenn man sich am Raumschiff befindet ...*
7 *B: Mhm.*
8 *S13: ... und ... man ... selbst sagt, dass man das ruhende System is, dann ... ja, würd'*
9 *ich schon sagen, dass das geht.*

Zitat 587

Obwohl Schülerin 13 die Längenkontraktion damit begründet, dass das relativ zur Bahn bewegte Gerät die Länge nicht richtig erfassen könne, sieht sie beide Werte als gleichberechtigt an und meint, dass sich die tatsächliche Länge der Bahn in den Systemen unterscheide. Jedenfalls wendet sie das Relativitätsprinzip gut an und meint, dass auch die Erde als bewegtes System betrachtet werden könne.

7.4.2. Zusammenfassung

Von den 13 befragten Schülern sagen 12, dass die Länge, die von einem relativ zur Bowlingbahn bewegten Messgerät gemessen wird, sich von dem Messwert, den ein relativ zur Bahn ruhendes Gerät anzeigt, unterscheidet. Sechs davon sagen, dass das relativ zur Bahn bewegte Gerät immer eine Verkürzung feststellt, eine davon meint, dass die Länge kürzer „wahrgenommen“, oder „angesehen“ werde. Vier Schüler behandeln die Längenkontraktion asymmetrisch und sagen in einer der Situationen einen kleineren und in der jeweils anderen einen größeren Messwert voraus. Eine Schülerin sagt einmal einen größeren Messwert und einmal den gleichen Messwert voraus, wobei sie ein verändertes Ergebnis nur erwartet, wenn sich die Bahn in dem Raumschiff befindet, das als bewegt abgebildet ist. Damit vernachlässigt sie, dass die Situation nach dem Relativitätsprinzip auch umgekehrt betrachtet werden kann. Eine Schülerin spricht nicht konkret darüber, ob es zu einer Verkürzung kommt, oder eine größere Länge gemessen wird, sondern spricht nur über ein abweichendes Ergebnis. Sie macht deutlich, dass dieses auf Ungenauigkeiten zurückzuführen sei. Eine Schülerin meint, dass in jeder Situation beide Messgeräte zum gleichen Resultat gelangen.

In den Erklärungen der Schüler zur Ursache der Längenkontraktion bzw. in ihren Reaktionen auf diese und ihre Symmetrie wird deutlich, dass vier Schüler sie ganz klar als tatsächliche Kontraktion, die nichts mit Messfehlern zu tun hat, ansehen. Fünf Schüler sehen Messfehler als Ursache für die Längenkontraktion an. Ein Schüler meint nur, dass es seltsam sei, dass die Längenkontraktion auftrete, obwohl Abstände durch die Messgeräte berücksichtigt werden. Eine Schülerin meint nur, dass sie keine Ursache für die Längenkontraktion nennen könne. Eine Schülerin bleibt dabei, die Längenkontraktion asymmetrisch anzuwenden. Anzumerken ist auch, dass es drei Schülern gelingt, zumindest ansatzweise eine korrekte Erklärung für die Längenkontraktion zu geben. Einer davon widerspricht in seiner Erklärung auf Rückfrage seiner früheren Aussage, dass Gleichzeitigkeit absolut sei.

Acht Schüler wenden das Relativitätsprinzip im Kontext der Längenkontraktion richtig an und meinen, dass es keinen absolut richtigen Wert für die Länge der Bowlingbahn gäbe. Zwei davon können nur die Symmetrie der Längenkontraktion nicht richtig anwenden. Unter den acht Schülern sind auch einige, die zuvor Messfehler zur Erklärung der Längenkontraktion verwendet haben. Es ist anzunehmen, dass sie die Verkürzung als realen Effekt betrachten, jedoch spontan nicht in der Lage waren, eine Erklärung für diesen zu finden, außer einem Problem bei der Messung. In diesen Fällen sind die Konzepte der Relativitätstheorie noch nicht tief genug verankert. Vier Schüler gehen von einem absoluten Wert für die Länge der Bowlingbahn aus. Zwei davon tun dies, obwohl sie anmerken, dass keiner der Werte richtig oder falsch sei. Drei der Schüler, die von einer absoluten Länge ausgehen, meinen in jedem Fall, dass der von dem Gerät, das sich im gleichen System wie die Bahn befindet gemessene Wert der richtige sei. Eine Schülerin meint, dass der auf der Erde gemessene Wert richtig sei und jeder Wert anhand einer Messung auf der Erde überprüft werden könne. Sie ist die einzige, die die Erde als ausgezeichnetes Bezugssystem sieht. Bei einer Schülerin kann überhaupt keine Aussage getroffen werden, ob sie verschiedene Werte für die Länge der Bowlingbahn als richtig ansieht, da sie jeden Unterschied auf eine Messungenauigkeit zurückführt. Sie sieht es jedenfalls als beliebig an, welches der Systeme sich bewegt - auch im Fall der Erde und eines vorbeifliegenden Raumschiffs.

7.5. Folgerungen

Da alle befragten Schüler zumindest für zwei Raumschiffe im Weltall eine brauchbare Vorstellung des Relativitätsprinzips haben und fast die Hälfte dieses sogar gut erfasst, stellt dieses offenbar kein großes Hindernis für den Unterricht zur Relativitätstheorie dar. Etwas mehr als die Hälfte der Schüler geht jedoch von einem absoluten äußeren Bezugssystem aus, das sie nicht näher definieren. Es ist deshalb schon im Rahmen des Unterrichts zur klassischen Physik nötig, ein solches System auszuschließen. Es finden sich auch nach dem Unterricht zur Relativitätstheorie noch bei vielen Schülern Hinweise auf die Vorstellung einer absoluten Bewegung. Der Vorstellung eines absoluten Bezugssystems und der einer absoluten Bewegung sollte gleichzeitig begegnet werden, da eine absolute Bewegung ein

absolutes Bezugssystem erfordert, und auch Schüler, die ein solches bewusst ausschließen, durch die Vorstellung einer absoluten Bewegung wieder in Argumentationen verfallen, die nicht zum Relativitätsprinzip passen.

Die überwältigende Mehrheit der Schüler wendet die klassische Geschwindigkeitsaddition in den besprochenen Fällen korrekt an. Das größte Problem stellt hierbei die Bestimmung der Geschwindigkeit eines sitzenden Passagiers relativ zu einem Messgerät, das sich im gleichen Raumschiff befindet, dar. Hier denken offenbar viele daran, dass das Gerät eine absolute Geschwindigkeit relativ zu einem äußeren Bezugssystem messen würde. Dieser Fall, der die Bedeutung eines Inertialsystems für die Beschreibung physikalischer Abläufe gut veranschaulicht, sollte ausführlich behandelt werden. Es wäre naheliegend, auch als Hausübung einfache mechanische Experimente in einem gleichmäßig fahrenden Zug durchführen zu lassen.

Mehr als die Hälfte der Schüler sagt in allen besprochenen Fällen die gemessene Geschwindigkeit des Lichtes korrekt voraus. Einige wenden die klassische Geschwindigkeitsaddition auf das Licht an, wobei die meisten dies im Sinne der klassischen Physik korrekt tun. Manche nennen die richtigen Messwerte auf anderer Grundlage als dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, zum Beispiel, da sie meinen, die Lichtgeschwindigkeit könne nicht überschritten werden (oder es könne zumindest nicht gemessen werden). Viele meinen zwar, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant sei, suchen aber eine Erklärung dafür. Es sollte demnach im Unterricht besonders (und immer wieder) betont werden, dass dieses Prinzip als Postulat am Beginn der Theorie steht und nicht theoretisch abgeleitet werden kann. Es muss Wert darauf gelegt werden, das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als Verallgemeinerung experimenteller Befunde darzustellen. Es stellt sich schließlich im Rahmen der Relativitätstheorie nicht die Frage, weshalb die Vakuumlichtgeschwindigkeit für jeden Beobachter den gleichen Wert hat, dies wird vielmehr vorausgesetzt. Bemerkenswert ist, dass einige Schüler offenbar auch nach dem Unterricht zur Relativitätstheorie überhaupt nicht mit dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit vertraut sind.

Die Behandlung der Effekte der Lichtlaufzeit führt erwartungsgemäß zu einiger Verwirrung bezüglich der Relativität der Gleichzeitigkeit. Es sprechen nach dem Unterricht zur Relativitätstheorie deutlich mehr Schüler die Lichtlaufzeit an als davor. Nicht einmal die Hälfte der Schüler sieht Gleichzeitigkeit als relativ an, und viele begründen die Relativität der Gleichzeitigkeit mit Messfehlern und der Lichtlaufzeit. Dies spricht erneut dafür, eine Definition der Gleichzeitigkeit bereits im Rahmen der klassischen Physik zu behandeln. Das könnte dazu führen, die Berücksichtigung der Lichtlaufzeit stärker von der Relativität der Gleichzeitigkeit zu entkoppeln, sodass es leichter fallen sollte, letztere als realen Effekt anzusehen, der trotz der Berücksichtigung der Lichtlaufzeit zustande kommt.

Einige Schüler stellen bei den Fragen zur Gleichzeitigkeit einen Bezug zur Zeitdilatation her. Dieser Effekt ist ihnen offenbar mehr in Erinnerung geblieben als die Relativität

der Gleichzeitigkeit, die kaum explizit angesprochen wird. Insbesondere sollte die Zeitdilatation somit einen motivierenden Einstieg in den Unterricht darstellen.

Die Längenkontraktion ist den Schülern deutlich besser in Erinnerung geblieben als die Relativität der Gleichzeitigkeit. Die meisten sagen eine Veränderung der Länge bei einem relativ zur Bowlingbahn bewegten Messgerät voraus, fast die Hälfte trifft in jedem der besprochenen Fälle die richtige Vorhersage. Daher sollte insbesondere die Längenkontraktion einen motivierenden Einstieg in den Unterricht darstellen.

Einige Schüler behandeln die Längenkontraktion asymmetrisch. Ihnen ist offenbar nicht bewusst, dass sie damit das Relativitätsprinzip verletzen, da es dafür einen absoluten Ruhezustand geben müsste. Nur bei wenigen Schülern ist deutlich zu sehen, dass sie die Kontraktion als realen Effekt betrachten. Manche sprechen zwar davon, dass keiner der Messwerte falsch sei, sehen aber dennoch eine absolute Länge der Bowlingbahn, was wiederum das Relativitätsprinzip verletzen würde. Die meisten Schüler sehen keinen der Werte als ausgezeichnet an, einige sehen den Wert des Geräts, das sich im gleichen Raumschiff wie die Bahn befindet, als richtig an, eine Schülerin einen auf der Erde bestimmten Wert. Es sollte im Unterricht demnach deutlich auf das Zusammenspiel des Relativitätsprinzips und der Längenkontraktion eingegangen werden. Die Symmetrie muss hervorgehoben, und mit geeigneten Aufgaben muss der Fehlvorstellung einer nicht symmetrischen Kontraktion explizit begegnet werden. Der Widerspruch zwischen der Existenz einer absoluten Länge und dem Relativitätsprinzip muss ausführlich thematisiert werden. Weiters sollte - am besten bereits im Rahmen der klassischen Physik - deutlich hervorgehoben werden, dass die Länge, genauso wie die Zeit, aus physikalischer Sicht nur über die Messung definiert ist, sodass nicht nur das Messgerät eine kürzere Länge anzeigt, sondern die Länge selbst aus der Sicht eines vorbeibewegten Beobachters verkürzt ist. Bekannte relativistische Scheinparadoxa könnten dazu dienen, diese Vorstellung zu vertiefen.

Scheinparadoxa würden auch helfen, das Zusammenspiel der relativistischen Effekte besser zu verstehen. Aus den Gesprächen wird deutlich, dass viele der befragten Schüler die verschiedenen Effekte nicht verknüpfen und als nebeneinanderstehend wahrnehmen. Nur wenigen gelingt es, die Längenkontraktion über die Zeitdilatation zu erklären, und niemand stellt selbst einen Bezug zur Relativität der Gleichzeitigkeit her, obwohl dieser qualitativ leicht gemacht werden und auch zur Herleitung der Längenkontraktion dienen kann.

Gespräche mit den Schülern nach den Interviews machen deutlich, dass es ihnen hilft, die Verbindung aller relativistischen Effekte zu sehen. Ebenso hat sich gezeigt, dass auf eine ordentliche Sprache geachtet werden muss - Schüler 9 stellte fest, dass es schwierig war, die Längenkontraktion richtig zu formulieren, nachdem im Schulbuch immer davon gesprochen wird, dass ein bewegtes Objekt verkürzt erscheint.

8. Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion

Die grundlegende Fragestellung dieser Arbeit ist, welche Vorstellungen die Schüler in den Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie mitbringen, und wie sich diese durch den Unterricht verändern. Dazu wurden 13 Schüler in problemzentrierten Interviews zu den Themen „Relativitätsprinzip“, „Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“, „Relativität der Gleichzeitigkeit“ und „Längenkontraktion“ vor und nach dem Unterricht zur speziellen Relativitätstheorie befragt. Die Forschungsfrage kann, bezogen auf die untersuchten Themengebiete, durch die vorliegenden Daten beantwortet werden. Die wichtigsten Ergebnisse werden hier noch einmal zusammengestellt.

- Die Schüler haben großteils für zwei Raumschiffe im Weltall eine gute Vorstellung des Relativitätsprinzips.
- Rund die Hälfte der Schüler hat das Relativitätsprinzip allgemein gut verstanden, kann dessen Bedeutung beschreiben und es in allen besprochenen Kontexten sicher anwenden.
- Mehr als die Hälfte der Schüler geht von absoluter Ruhe und absoluter Bewegung aus, die auch von den Messgeräten zur Geschwindigkeitsmessung erfasst wird. Alltagssituationen, wie das Fahren in einem Zug, eignen sich, um das Prinzip der Relativgeschwindigkeit zu veranschaulichen.
- Etwa drei Viertel der Schüler können die klassische Geschwindigkeitsaddition vor dem Unterricht zur Relativitätstheorie in allen besprochenen Kontexten sicher anwenden. Nach dem Unterricht können es fast alle.
- Fast drei Viertel der Schüler sind von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit überrascht. Nach dem Unterricht sagt mehr als die Hälfte in allen besprochenen Situationen die richtigen Messwerte für das Licht voraus, jedoch bezieht sich nur rund die Hälfte tatsächlich auf das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.
- Manche Schüler hätten gerne eine Begründung für das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.
- Etwa ein Drittel der Schüler thematisiert von sich aus vor dem Unterricht zur Relativitätstheorie Effekte der Lichtlaufzeit. Nach dem Unterricht tun dies fast alle.
- Vor dem Unterricht ist die Vorstellung von absoluter Gleichzeitigkeit vorherrschend, nach dem Unterricht sieht immer noch weniger als die Hälfte der Schüler Gleichzeitigkeit als relativ an. Insbesondere werden in beiden Situationen trotz der klaren Aussage, dass es sich um ideale Messgeräte handelt, Messfehler häufig als Ursache der Relativität der Gleichzeitigkeit angesehen. Daran ändert auch die Erläuterung, dass es sich beim Messprozess um eine Sammlung von Daten mit anschließender Auswertung handelt, nicht viel.

- Die Zeitdilatation ist den Schülern offenbar besser im Gedächtnis geblieben als die Relativität der Gleichzeitigkeit.
- Vor dem Unterricht sehen alle Schüler Längen als absolut an, nach dem Unterricht nur noch rund die Hälfte.
- Fast die Hälfte der Schüler, die die Längenkontraktion anwenden, wendet sie asymmetrisch an.
- Ein Viertel der Schüler die keinen der Messwerte für die Länge als falsch ansehen, gehen dennoch von einer absoluten Länge der Bowlingbahn aus.
- Etwa einem Drittel der Schüler scheint nicht klar zu sein, dass die Länge eines Objekts nur durch die Messung definiert ist.
- Nur drei der 13 befragten Schüler finden eine Erklärung für die Längenkontraktion. Alle verwenden dabei die Zeitdilatation, niemand erklärt sie über die Relativität der Gleichzeitigkeit.
- Den Schülern ist offenbar nicht bewusst, dass die Länge über die gleichzeitige Bestimmung des Anfangs- und Endpunkts eines Objekts gemessen wird.
- Es finden sich kaum Hinweise darauf, dass das erdfeste System als ausgezeichnet betrachtet wird. Nur eine Schülerin macht diese Vorstellung deutlich.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse lässt sich zunächst sagen, dass die verschiedenen Effekte, die im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie behandelt werden, unterschiedlich gut bei den Schülern ankommen. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, oder die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht überschritten werden kann, werden oft von den Schülern genannt, die Relativität von Längen ebenfalls von vielen, wobei die Längenkontraktion nur von etwa der Hälfte der Schüler korrekt angewandt wird. Schließlich wird Gleichzeitigkeit nicht einmal von der Hälfte der Schüler als relativ angesehen. Es lassen sich auch Hinweise darauf finden, dass die Zeitdilatation den Schülern eher im Gedächtnis geblieben ist als die Relativität der Gleichzeitigkeit.

Bemerkenswert ist, dass die klassische Geschwindigkeitsaddition großteils sicher angewandt wird, da dies im Widerspruch zu den Ergebnissen von [Wit12] steht. Es ist anzunehmen, dass dies daran liegt, dass die in dieser Studie befragten Schüler im Schnitt etwa vier Jahre älter waren als jene, die in [Wit12] interviewt wurden.

Für ein Unterrichtskonzept ergeben sich daraus wichtige Schlussfolgerungen:

- 1) Der Vorstellung absoluter Ruhe und Bewegung und absoluter Bezugssysteme sollte im Rahmen der klassischen Physik ausführlich begegnet werden, um günstige Voraussetzungen für die Behandlung der Relativitätstheorie zu schaffen.

- 2) Es muss den Schülern klar vermittelt werden, dass Längen und Zeiten (und überhaupt alle physikalischen Größen) über ihre Messung definiert sind. Andernfalls könnten Schüler unter anderem die Längenkontraktion nur auf die Messung beziehen und nicht auf die Länge eines Objekts in einem relativ dazu bewegten System.
- 3) Eine Definition der Gleichzeitigkeit und die Behandlung der Lichtlaufzeit sollte im Rahmen der klassischen Physik erfolgen, um diese von der Relativität der Gleichzeitigkeit zu entkoppeln. Schüler sehen die Lichtlaufzeit aufgrund der engen zeitlichen Abfolge im Unterricht oft als Ursache der Relativität der Gleichzeitigkeit an. Es könnte auch helfen, die Beispiele zur Herleitung der Relativität der Gleichzeitigkeit zunächst vom Standpunkt der klassischen Physik zu behandeln (in der die Lichtgeschwindigkeit nicht konstant ist und somit Gleichzeitigkeit absolut), um den Unterschied zu verdeutlichen.
- 4) Im Unterricht muss ganz klar hervorgehoben werden, dass das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auf experimentellen Befunden beruht, und nicht theoretisch abgeleitet und begründet werden kann.
- 5) Die Symmetrie der Längenkontraktion muss im Unterricht hervorgehoben werden. Es sollten Aufgaben entwickelt werden, die die Vorstellung einer asymmetrischen Längenkontraktion herausfordern und klar machen, dass diese dem Relativitätsprinzip nicht entsprechen würde. Über die Zeitdilatation kann auf Grundlage der Daten keine analoge Aussage gemacht werden, da die Vorstellungen der Schüler zu dieser nicht erhoben wurden.
- 6) Der Zusammenhang zwischen den relativistischen Effekten muss im Unterricht stark verdeutlicht werden, da einige Schüler diese offenbar nicht miteinander verbinden. Es könnten relativistische Scheinparadoxa dazu dienen, wie sie sich zum Beispiel in [Apo19] finden.

Neben diesen Folgerunden für ein Unterrichtskonzept aus den Ergebnissen gibt es noch einige Punkte, zu denen die Schülervorstellungen erhoben werden sollten:

- Analog zu den Fragen zur Längenkontraktion sollten die Vorstellungen zur Zeitdilatation erhoben werden.
- Fragen, mit denen festgestellt werden kann, ob die Schüler bei der Längenkontraktion eine Verkürzung in allen Richtungen annehmen, müssen formuliert werden. Dazu sollten anschließend weitere Interviews durchgeführt werden.
- Es sollten weitere Fragen entwickelt werden, um genauer zu überprüfen, ob die Erde als ausgezeichnetes Bezugssystem gesehen wird, da, im Gegensatz zu dieser Studie, andere Ergebnisse von dieser Vorstellung berichten. Dazu könnte auch versucht werden, die Schüler das Zwillingsparadoxon erklären zu lassen.

- Es könnte eine Interviewstudie durchgeführt werden, in der sowohl 13- und 14-jährige als auch 17- bis 18-jährige zur klassischen Geschwindigkeitsaddition befragt werden. Somit kann untersucht werden, ob die verschiedenen Ergebnisse dieser Studie und der Befragung in [Wit12] durch das Alter der Schüler zu erklären sind.
- Schülervorstellungen zur Masse in der Relativitätstheorie müssen noch erhoben werden. Dies betrifft sowohl die Äquivalenz von Masse und Energie als auch Vorstellungen zur relativistischen Masse. Bei letzterer muss Unterrichtsmaterial entwickelt werden, das den Sachverhalt - anders als die in Österreich gängigen Schulbücher - korrekt darstellt und eine Verallgemeinerung des Impulses als Ursache für die divergierende Trägheit nennt.
- Es muss erforscht werden, welche Vorstellungen Schüler mit Inertialsystemen verbinden, und ob sie diese als Netz von Beobachtern mit synchronisierten Uhren visualisieren. Ebenso sollte erhoben werden, was sich die Schüler unter Ereignissen im Rahmen der Relativitätstheorie vorstellen.

Für das weitere Vorgehen zur Entwicklung eines Unterrichtskonzepts, das eine angemessene Vorstellung der speziellen Relativitätstheorie ermöglicht, werden folgende Schritte vorgeschlagen:

- 1) Interviewstudien zu den oben genannten Punkten und kurze Interviews zu einzelnen Punkten, die unklar geblieben sind, werden durchgeführt, um eine möglichst sichere Basis für die weitere Forschung zu schaffen.
- 2) Aus den Ergebnissen der Interviewstudien wird ein Fragebogen erstellt, der von den Schülern in weniger als einer Unterrichtsstunde bearbeitet werden kann. Dazu können auch die Ergebnisse des RCI nach [AS13] herangezogen werden. Dieser Fragebogen wird anschließend von einer großen Schülerzahl bearbeitet, um eine breite Basis gut erforschter Schülervorstellungen für die Entwicklung eines Unterrichtskonzepts zur Hand zu haben. Der Fragebogen kann auch in zwei Teile geteilt werden, falls er zu umfangreich ist. Zu Beginn sollte der Fragebogen von wenigen Schülern bearbeitet und diese anschließend interviewt werden, um dessen Validität zu überprüfen und ihn gegebenenfalls anzupassen.
- 3) Ein Unterrichtskonzept wird auf Grundlage der Forschungsergebnisse zu den Schülervorstellungen entwickelt und ausführlich getestet. Unterrichtsmaterial wird entwickelt, um die Unterrichtsvorbereitung zum Thema für Lehrkräfte zu erleichtern. Die Entwicklung kann dabei schrittweise erfolgen, es sollte anschließend aber jedenfalls das gesamte Konzept durchgeführt und die Effektivität überprüft werden. Dazu kann der in Schritt 2 erarbeitete Fragebogen oder ein neues Testinstrument dienen.

Literatur

- [Apo19] M. Apolin, **big bang 8**, 1. Auflage, Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG, Wien, 2019
- [AS13] J. S. Aslanides, C. M. Savage, **Relativity concept inventory: Development, analysis, and results** in Physical Review Special Topics - Physics Education Research 9(1), 010118, 2013
- [AV95] S. Arruda, A. Villani, **Conceptual Change in Special Relativity Theory: Contributions of the History of Science** in „Proceedings of the Third International History, Philosophy and Scienceteaching Conference von F. Finley, D. Allchin, D. Rhees, S. Fifield (Hrsg.), Minneapolis, MN: University of Minnesota (pp. 53-61), 1995
- [BDAG93] L. Borghi, A. de Ambrosis, E. Ghisolfi, **Teaching special relativity in high school** in „The Proceedings of the third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics“ von J. Novak (Hrsg.), Ithaca, NY: Misconceptions Trust (pp. 444-460), 1993
- [BWW14] J.-P. Burde, T. Wilhelm, H. Wiesner, **Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I**, in PhyDid-B - Didaktik der Physik - Frühjahrstagung Frankfurt 2014, 2014
- [Byb15] R. W. Bybee, **The BSCS 5E Instructional Model - Creating Teachable Moments**, Arlington, NSTA Press, 2015
- [Dem13] W. Demtröder, **Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme**, 6. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [Dew10] J. Dewey, **How we think**, Boston, D. C. Heath & Co., 1910
- [DHR13] R. Duit, R. Hepp, K. Rincke, **Guter Frontalunterricht** in „Unterricht Physik“ Heft 135/136, Autoren sind Herausgeber, 2013
- [diS88] A. A. diSessa, **Knowledge in Pieces** in „Constructivism in the Computer Age“ (pp. 49-70) von G. Forman, P. B. Pufall (Hrsg.), Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1988
- [DSWH18] R. Duit, H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, **Schülervorstellungen**, 1. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018
- [Dui09] R. Duit, **Alltagsvorstellungen und Physiklernen** in „Physikdidaktik - Theorie und Praxis“ (pp. 605-630) von E. Kircher, R. Girwidz, P. Häußler (Hrsg.), Berlin Springer-Verlag, 2009
- [Dui11] R. Duit, **Schülervorstellungen - von Lerndefiziten zu neuen Unterrichtsansätzen** in „Schülervorstellungen in der Physik: Festschrift für Hartmut Wiesner“ von R. Müller, H. Wiesner, M. Hopf (Hrsg.), Köln, Aulis-Verlag (pp. 8-14), 2011
- [Ein05] A. Einstein, **Zur Elektrodynamik bewegter Körper** in „Annalen der Physik“ 17, 891-921 (1905)
- [Elb01] A. Elby, **Helping physics students learn how to learn** in American Journal of Physics 69 (pp. 54-64), 2001

- [Emb10] F. Embacher, **Elemente der theoretischen Physik - Band 1: Klassische Mechanik und spezielle Relativitätstheorie - Eine Einführung für das Lehramts- und Bachelorstudium**, 1. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010
- [Fli18] T. Fließbach, **Die relativistische Masse**, 1. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2018
- [Fli20] T. Fließbach, **Mechanik - Lehrbuch zur Theoretischen Physik I**, 8. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2020
- [Haw12] S. Hawking, **Eine kurze Geschichte der Zeit**, 2. Auflage, Rowohlt Verlag GmbH., 2012
- [HLADL16] M. M. Hull, B. A. Lindsey, M. Archambault, K. Davey, A. Y. Liu, **Unexpected attitudinal growth in a course combining reformed curricula**, Physical Review Physics Education Research 12, 010101, 2016
- [IF19] K. Itakura, H. Funahashi, **Hypothesis Experiment Class**, None Edition, Trans Pacific Press, 2019
- [Kor13] Teil von 1. Korinther 13,9, Bibel (Neues Testament)
- [Mac82] A. Machold, **Schülervorstellungen vor und während des Unterrichts in spezieller Relativitätstheorie**, in physica didactica 9 (pp. 175-189), 1982
- [May16] P. Mayring, **Einführung in die qualitative Sozialforschung - Eine Anleitung zu qualitativem Denken**, 6. Auflage, Beltz Verlag, Weinheim und Basel, 2016
- [NNZ19] A. Nussbaumer, P. Nussbaumer, S. Zunzer, **Physik compact 8**, Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG, Wien, 2019
- [PT15] A. Pelissetto, M. Testa, **Getting the Lorentz transformations without requiring an invariant speed** in American Journal of Physics 83 (pp. 338-340), 2015
- [Rei08] K. Reich, **Konstruktivistische Didaktik - Lehr- und Studienbuch mit Medienpool**, 4. durchgesehene Auflage, Beltz-Verlag - Weinheim und Basel, 2008
- [Rin06] W. Rindler, **Relativity - Special, General and Cosmological**, 2nd Edition, Oxford University Press, 2006
- [Sch07] R. Scherr, **Modeling student thinking: An example from special relativity** in American Journal of Physics 75, 272, 2007
- [Sch91] H. J. Schlichting, **Zwischen common sense und physikalischer Theorie - wissenschaftstheoretische Probleme beim Physiklernen** in Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht 44 (pp. 74-80), 1991
- [Sel11] G. S. Selcuk, **Adressing pre-service teachers' understanding and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity** in European Journal of Physics 32, Nr. 1 (pp. 1-13), 2011
- [Sexl19] R. U. Sexl, H. Kühnelt, H. Stadler, P. Jakesch, E. Sattlberger, **Sexl Physik 8**, Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG, Wien, 2019

- [Sha63] R. S. Shankland, **Conversations with Einstein** in American Journal of Physics 31 (pp. 47-57), 1963
- [Sha64] R. S. Shankland, **Conversations with Einstein** in American Journal of Physics 32 (p. 16), 1964
- [SSV01] R. Scherr, P. Shaffer, S. Vokos, **Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames** in American Journal of Physics 69, Nr. S1 (pp. 24-35), 2001
- [SSV02] R. Scherr, P. Shaffer, S. Vokos, **The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity** in American Journal of Physics 70, Nr. 12 (pp. 1238-1248), 2002
- [VP87] A. Villani, J. L. A. Pacca, **Students' spontaneous ideas about the speed of light** in International Journal of Science Education 9, Nr. 1 (pp. 55-66), 1987
- [Wit12] H. Wittmann, **Gleichzeitigkeit in der Relativitätstheorie - eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe I.**, Dissertation, Universität Wien 2012
- [WSH17] H. Wiesner, H. Schecker, M. Hopf, **Physikdidaktik kompakt**, 3. Auflage, Aulis Verlag in Friedrich Verlag GmbH, 2017
- [WWWTRH16] , H. Wiesner, T. Wilhelm, C. Waltner, V. Tobias, A. Rachel, M. Hopf, **Kraft und Geschwindigkeitsänderung - Neuer fachdidaktischer Zugang zur Mechanik**, Aulis in der Stark Verlag GmbH, 2016

Internetquellen

- [1] MILQ - Quantenphysik in der Schule, abrufbar unter <https://www.milq.info/?fbclid=IwAR015ybmfiDsT71YHnraJ96QOS-IM5RreBMbcW-Vh6mqXRNfwlkAZ-7dWLI>, zuletzt abgerufen am 26.8.2022, um 13:13
- [2] F. Embacher, **Spezielle Relativitätstheorie**, Kapitel 8 zur Lorentztransformation, abrufbar unter <https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT/Lorentztransformation.html>, zuletzt abgerufen am 22.8.2022, um 16:15
- [3] J.M. Heinzle, **Introduction to Relativity and Cosmology I**, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, verfügbar unter https://gravity.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/i_gravity_physics/material/teaching/rt1/WS_2009/RThI_Version8.pdf, zuletzt abgerufen am 9.8.2022 um 18:06
- [4] mathepunk (YouTube-Kanal), **Die Lorentzkraft als Folge relativistischer Lorentzkontraktion**, Beschreibung unterhalb des Videos, abrufbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=gmw2rvwhk-U>, zuletzt abgerufen am 19.8.2022, um 13:46
- [5] Österreichischer Lehrplan (AHS), **Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne - allgemeinbildende höhere Schulen**, abrufbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>, zuletzt abgerufen am 22.8.2022, um 16:18
- [6] R. Scherr, A. Elby, **Open Source Tutorials: Relating equations to common sense: „Oomph“**, aus den „Open Source Tutorials“, entwickelt an der Universität Maryland, frei verfügbar unter https://www.physport.org/curricula/MD_OST/, zuletzt abgerufen am 17.8.2022, um 16:54

A. Interviewleitfaden

Im Folgenden ist der gesamte für die Schülerinterviews zur Erhebung der Lernendenvorstellungen verwendete Interviewleitfaden inklusive Abbildungen dargestellt.

A.1. Relativitätsprinzip

Frage 1: Stell dir vor, du sitzt in einem Raumschiff A, und neben dir befindet sich ein weiteres Raumschiff B, das sich in die entgegengesetzte Richtung bewegt (Abb. A.1). Du siehst, dass du dich relativ zum anderen Raumschiff bewegst. Nehmen wir an, nichts außer den beiden Raumschiffen ist sichtbar. Kannst du feststellen, ob sich dein Raumschiff bewegt, oder das andere, oder beide? Begründe deine Antwort!

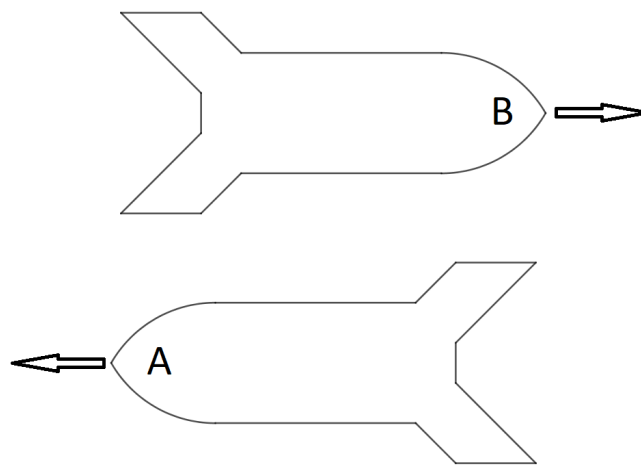


Abb. A.1: Zu Frage 1. Die Raumschiffe A und B bewegen sich relativ zueinander.

Überleitung: Nachdem weder wir noch die Insassen im anderen Raumschiff auf irgendeine Weise feststellen können, ob eines der Raumschiffe ruht oder auch nicht, gibt es offenbar kein „bevorzugtes“ Raumschiff, also keinen allgemeinen Ruhezustand. Für Vergleiche kann also nur die Relativgeschwindigkeit von Bedeutung sein.

A.2. Geschwindigkeitsaddition und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Frage 2: Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit $v = 100000 \text{ km/s}$. Auf beiden Raumschiffen befinden sich Messgeräte, die die Geschwindigkeit von Dingen in Raumschiff B messen. Betrachten wir einen in Raumschiff B sitzenden Passagier (Abb. A.2).

- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff B für den in B sitzenden Passagier?
- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff A für den in B sitzenden Passagier?

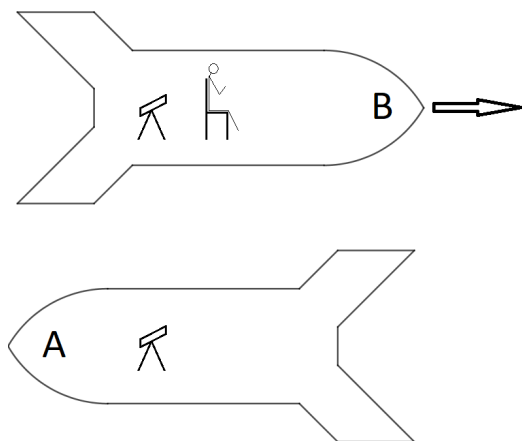


Abb. A.2: Zu Frage 2. Die Geschwindigkeit eines in Raumschiff B sitzenden Passagiers wird von Messgeräten in beiden Raumschiffen bestimmt.

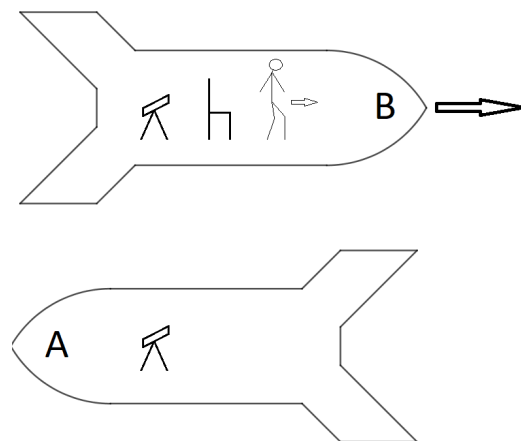


Abb. A.3: Zu Frage 3. Die Geschwindigkeit eines in Raumschiff B gehenden Passagiers wird von Messgeräten in beiden Raumschiffen bestimmt.

Frage 3: Der Passagier steht auf und geht nun in die Richtung, in die sich Raumschiff B bewegt (Abb. A.3).

- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff B für den in B gehenden Passagier?
- Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff A für den in B gehenden Passagier?

Frage 4: Im Raumschiff B befindet sich eine Lampe (Lichtgeschwindigkeit $c = 300000 \text{ km/s}$), die in die Richtung leuchtet, in die sich Raumschiff B bewegt (Abb. A.4). Die Lampe wird eingeschaltet.

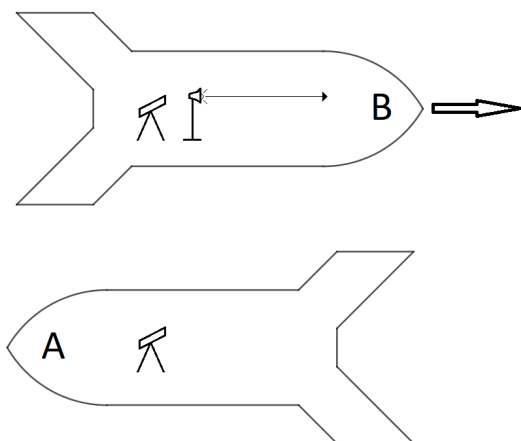


Abb. A.4: Zu Frage 4. Die Geschwindigkeit eines von einer Lampe auf Raumschiff B ausgesandten Lichtstrahls wird von Messgeräten auf beiden Raumschiffen bestimmt.

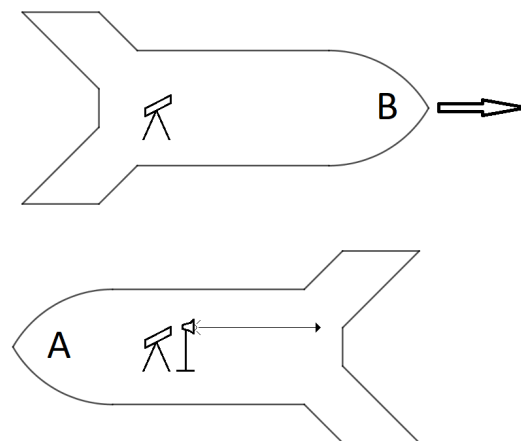


Abb. A.5: Zu Frage 5. Die Geschwindigkeit eines von einer Lampe auf Raumschiff A ausgesandten Lichtstrahls wird von Messgeräten auf beiden Raumschiffen bestimmt.

- a) Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff B für die Lichtfront?
- b) Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff A für die Lichtfront?

Frage 5: In Raumschiff A befindet sich ebenfalls eine solche Lampe, die ebenfalls in die Richtung leuchtet, in die sich Raumschiff B bewegt (Abb. A.5). Die Lampe wird eingeschaltet.

- a) Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff A für die Lichtfront?
- b) Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raumschiff B für die Lichtfront?

Frage 6: Tatsächlich haben Messungen ergeben, dass in allen Situationen beide Messgeräte den gleichen Wert für die Geschwindigkeit der Lichtfront messen – unabhängig von der Relativgeschwindigkeit der Raumschiffe. Wie stehst du dazu?

A.3. Gleichzeitigkeit

Frage 7: Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B mit $v = 100000 \text{ km/s}$. Auf beiden Raumschiffen befinden sich Messgeräte, die exakt messen können, ob zwei Ereignisse gleichzeitig geschehen. In Raumschiff B werden zwei Fernseher F1 und F2 eingeschaltet (Abb. A.6). Das Gerät in B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet wurden. Was misst das Gerät in Raumschiff A? Begründe deine Antwort!

Frage 8: Kann es sein, dass das Gerät in Raumschiff A misst, dass die Fernseher nicht gleichzeitig eingeschaltet werden? Welcher würde dann zuerst eingeschaltet? Wäre das seltsam? Begründe deine Antwort!

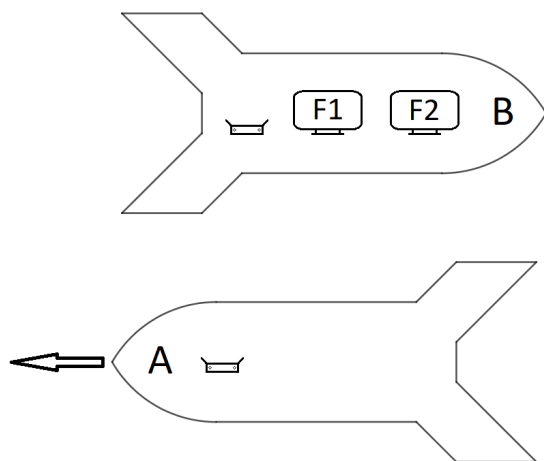


Abb. A.6: Zu Frage 7. Messgeräte auf beiden Raumschiffen messen, ob die Fernseher F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden.

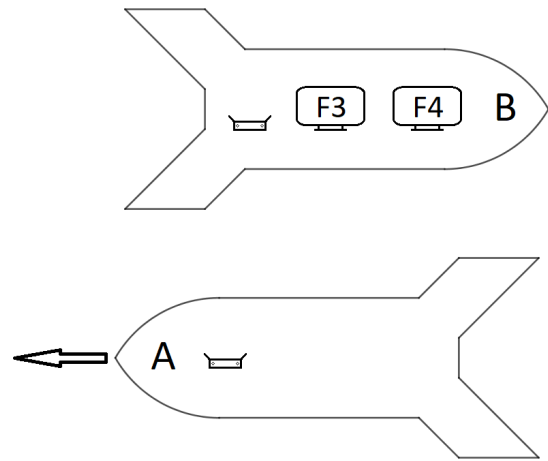


Abb. A.7: Zu Frage 9. Messgeräte auf beiden Raumschiffen messen, ob die Fernseher F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden.

Frage 9: Es werden zwei Fernseher F3 und F4 in Raumschiff B eingeschaltet (Abb. A.7). Das Gerät auf Raumschiff A misst, dass beide gleichzeitig eingeschaltet wurden. Was misst das Gerät in Raumschiff B? Begründe deine Antwort!

Frage 10: Kann es sein, dass das Gerät in Raumschiff B misst, dass die Fernseher nicht gleichzeitig eingeschaltet werden? Welcher würde dann zuerst eingeschaltet? Wäre das seltsam? Begründe deine Antwort!

Frage 11: Tatsächlich ergibt sich, dass Ereignisse, die aus Sicht von Raumschiff A gleichzeitig stattfinden, in Raumschiff B nicht gleichzeitig stattfinden und umgekehrt. Was sagst du zu dieser Tatsache?

A.4. Relativität von Raum und Längen

Frage 12: Raumschiff B bewegt sich mit einer Relativgeschwindigkeit von $v = 100000 \text{ km/s}$ an Raumschiff A vorbei. Auf beiden Raumschiffen befinden sich Messgeräte, die die Länge von Objekten messen können. Auf Raumschiff B befindet sich eine Bowlingbahn (Abb. A.8). Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Länge der Bowlingbahn den Wert 18,3m. Welche Länge misst das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn? Begründe deine Antwort!

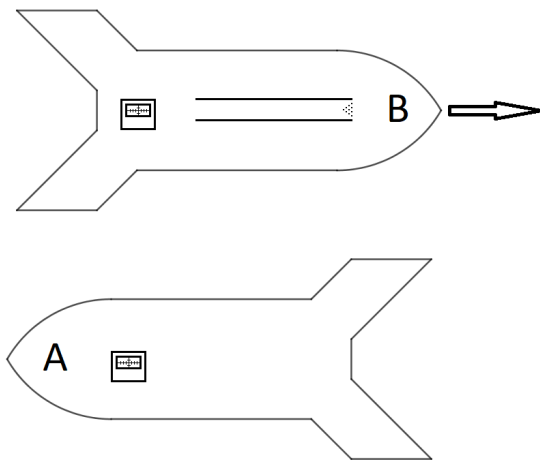


Abb. A.8: Zu Frage 12. Die Länge einer Bowlingbahn auf Raumschiff B wird von Messgeräten auf beiden Raumschiffen gemessen.

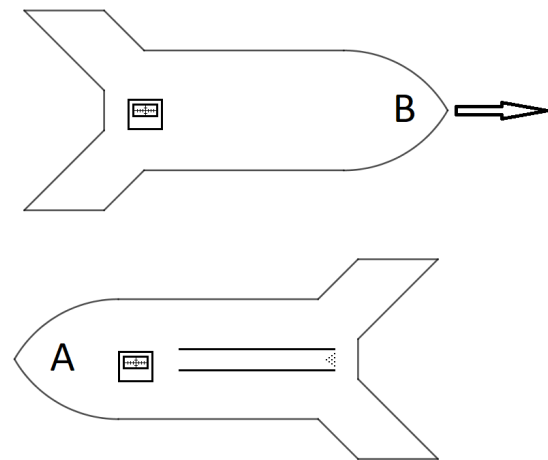


Abb. A.9: Zu Frage 13. Die Länge einer Bowlingbahn auf Raumschiff A wird von Messgeräten auf beiden Raumschiffen gemessen.

Frage 13: Auf Raumschiff A befindet sich ebenfalls eine Bowlingbahn (Abb. A.9). Das Gerät auf Raumschiff A misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3m. Welche Länge misst das Gerät auf Raumschiff B für die Bowlingbahn? Begründe deine Antwort!

Frage 14: Messungen in der Realität haben ergeben, dass das Gerät, das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt, immer eine kleinere Länge für die Bowlingbahn misst. Was sagst du zu dieser Tatsache?

Frage 15: Das Messgerät, das relativ zur Bowlingbahn ruht, und das andere, das sich relativ zu ihr bewegt, messen also unterschiedliche Ergebnisse für die Länge der Bahn. Gibt es dabei ein richtiges Ergebnis, oder haben etwa beide recht? Welches wäre das? Begründe deine Antwort!

Frage 16: Ein Raumschiff bewegt sich nun relativ zur Erde mit einer Relativgeschwindigkeit von $v = 100000 \text{ km/s}$. Auf der Erde befindet sich eine Bowlingbahn, und ein Messgerät auf der Erde misst für diese eine Länge von 18,3m (Abb. A.10). Welchen Wert misst das Gerät auf dem Raumschiff? Welcher der Werte ist korrekt? Begründe deine Antwort!

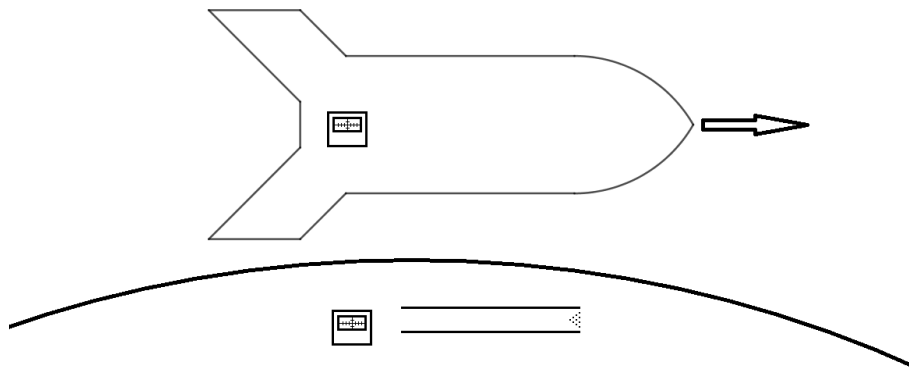


Abb. A.10: Zu Frage 16. Die Länge einer Bowlingbahn auf der Erde wird von einem Messgerät auf der Erde und einem auf einem vorbeifliegenden Raumschiff gemessen.

B. Transkripte der 1. Interviewrunde

In diesem Abschnitt sind die Transkripte der Interviews der ersten Runde ersichtlich.

Interview 1:

- 1 B: Wir schauen uns als erstes einfach mal zwei Raumschiffe an, A und B und die bewegen sich aneinander
2 vorbei, durch die Pfeile angedeutet. Hätte man jetzt auf Raumschiff A, oder B irgendeine Möglichkeit
3 festzustellen welches Raumschiff sich bewegt und welches stillsteht, oder ob sich beide bewegen? Man sieht
4 sonst nichts, keine Sterne, gar nichts.
- 5 S1: Also ich seh nur die zwei Raumschiffe? Ob sich eins bewegt (.)?
- 6 B: Du befindest dich, sagen wir einmal auf Raumschiff A und du müsstest jetzt beurteilen bewegen wir
7 uns, oder die anderen, oder beide. Geht das irgendwie, oder ist das aussichtslos?
- 8 S1: Ich hätt gesagt das ist aussichtslos.
- 9 B: Und das ist auch so. Das heißt worum es geht, ist tatsächlich nur, wie schnell ist die Relativgeschwin-
10 digkeit. Wer sich bewegt, vollkommen egal. Jetzt befinden sich auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die
11 die Geschwindigkeit von Objekten exakt messen können. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff
12 A mit 100.000 km/s und es sitzt dort ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät auf
13 Raumschiff B für den Passagier? Der sitzt.
- 14 S1: Ja diese 100. Also.
- 15 B: Ja das befindet sich aber auf dem Raumschiff und fliegt mit. Was wird das messen für den?
- 16 S1: Ja die Geschwindigkeit von... Ja, ne warte. Die... Null, weil, die anderen Dinge bewegen sich ja nicht.
- 17 B: Genau, die beiden stehen ja... direkt nebeneinander quasi. Was wird dieses Messgerät (auf Raumschiff
18 A; Anm.) für die Geschwindigkeit des Passagiers messen?
- 19 S1: Ja diese hundert... tausend, was sie gesagt haben.
- 20 B: Genau. Ok. Ähnliche Situation, einziger Unterschied, der Passagier steht auf und geht mit 4km/h in
21 Richtung der Spitze von Raumschiff B. Was wird jetzt das Messgerät auf Raumschiff B für seine Geschwin-
22 digkeit messen?
- 23 S1: Die 4 km/h(.)?
- 24 B: Und was wird dieses Messgerät (auf Raumschiff A; Anm.) messen?
- 25 S1: Die 1004 km, oder...
- 26 B: Die 100.000.
- 27 S1: Ja, 100.004 km/h.
- 28 B: Und die 4 noch dazu.
- 29 S1: Genau.
- 30 B: Ok. Jetzt ersetzen wir unseren Passagier... durch eine Lampe und diese Lampe sendet Licht in Rich-
31 tung der Spitze von Raumschiff B. Licht bewegt sich mit 300.000 km/s ungefähr. Welche Geschwindigkeit
32 wird dieses Messgerät auf Raumschiff B für das Licht messen.
- 33 S1: Ja die 300.000.
- 34 B: Ok. Und was wird das Messgerät auf Raumschiff A messen für das Licht?
- 35 S1: Die 300.000 plus... die Geschwindigkeit von dem (Raumschiff B, Relativgeschwindigkeit; Anm.).
- 36 B: Ok. Wieder sehr ähnlich, die Lampe befindet sich aber jetzt auf Raumschiff A. (Das Licht; Anm.)
37 bewegt sich jetzt in Richtung Heck von Raumschiff A. Was wird das Messgerät auf Raumschiff A für das
38 Licht messen?
- 39 S1: (4 Sekunden Pause; Anm.)... Ja genau das gleiche, oder(.)? Wieder die 300.000...
- 40 B: Also Licht bewegt sich jetzt dahin, das Raumschiff (B; Anm.) bewegt sich auch dahin mit 100.000 km/s.
41 Was wird das Messgerät auf Raumschiff B für das Licht messen?
- 42 S1: Ähm... die 300.000 vom Licht... und auch die Geschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit; Anm.).
- 43 B: Wird's was Größeres jetzt als die Lichtgeschwindigkeit messen, oder was kleineres? Weil sie bewegen
44 sich... in die gleiche Richtung.
- 45 S1: Aso, wart', dann was Kleineres. Weil sie ja in die gleiche Richtung gehen, oder?
- 46 B: Ok. Danke.

47 S1: (lacht)

48 B: Ja. Ähm und jetzt. In tatsächlichen Messungen, die man schon seit über 100 Jahren tatsächlich

49 durchführt, hat man herausgefunden: Egal wie sich das Messgerät relativ zum Licht bewegt, es misst

50 immer genau 300.000 km/s. Was sagst du dazu? Überraschend für dich, oder...

51 S1: ... Ja das heißt halt, dass das Licht immer quasi gleich schnell ist.

52 B: Und auch egal wie sich die Lichtquelle bewegt.

53 S1: ... bewegt ja, Licht bleibt Licht.

54 B: Ja, so schaut's aus, ja. Ähnlich, aber jetzt ein bisschen was anderes. Wieder zwei Raumschiffe bewegen

55 sich mit 100.000 km/s relativ zueinander. Jetzt haben wir Messgeräte, die messen können, exakt messen

56 können, ob etwas gleichzeitig stattfindet, oder nicht. Wir haben zwei Fernseher F1 und F2 auf Raumschiff

57 B, die werden eingeschaltet. Das Messgerät in Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet wer-

58 den.

59 S1: Ja

60 B: Was misst das Messgerät auf Raumschiff A?

61 S1: Ja, dann auch, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.

62 B: Mhm. Würdest du sagen es gibt irgendeine Möglichkeit, dass es was anderes messen würde?

63 S1: Ja wenn ein Fehler drin ist (lacht) ... im System.

64 B: Ok, ja. Und wenn wir perfekte Messungen haben, wie schaut's dann aus?

65 S1: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Mmm ja ne dann nicht.

66 B: Jetzt haben wir wieder zwei Fernseher, zur Unterscheidung F3 und F4.

67 S1: Ja.

68 B: Und diesmal misst das Gerät auf Raumschiff A, dass die gleichzeitig eingeschaltet werden. Was wird

69 das Gerät auf Raumschiff B messen?

70 S1: Ja auch, dass sie gleichzeitig sind, wenn kein Fehler im System ist.

71 B: Ok. Und jetzt haben tatsächliche Messungen ergeben. Das Messgerät, dass sich relativ zu denen bewegt,

72 oder formulieren wir es anders. Wenn Ereignisse hier auf Raumschiff B gleichzeitig stattfinden, wird das

73 Messgerät hier (auf Raumschiff A; Anm.) tatsächlich immer messen, dass sie nicht gleichzeitig stattfinden.

74 Bei perfekter Messung.

75 S1: Ja.

76 B: Was sagst du dazu?

77 S1: (lacht) Das muss irgendwo ein Fehler sein und dann kann man ... halt immer, wenn es ... also muss

78 man es halt umdrehen, wenn es ... da (auf Raumschiff B; Anm.) sagt, dass, also wenn es gleichzeitig

79 eingeschaltet wird und das falsch anzeigt quasi, dann weiß man dann automatisch, dass es wieder richtig

80 angezeigt, also, dass die gleichzeitig eingeschaltet werden.

81 B: Ok, also du würdest sagen es kann sich nur um einen Fehler handeln.

82 S1: Ja.

83 B: Ok. Gut. Jetzt haben wir zwei Messgeräte, die exakt Längen bestimmen können.

84 S1: Ja.

85 B: Wieder bewegt sich Raumschiff B relativ mit 100.000 km/s zu Raumschiff A...

86 S1: Mhm.

87 B: ... und auf Raumschiff B haben wir eine Bowlingbahn.

88 S1: Ja.

89 B: Das Messgerät auf Raumschiff B misst eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Was misst das Gerät

90 in Raumschiff A?

91 S1: Auch 18,3.

92 B: Ok. ... Und jetzt haben wir auch natürlich eine Bowlingbahn auf Raumschiff A und hier misst dieses

93 Messgerät auf Raumschiff A eine Länge von 18,3 m. Was misst das Gerät auf Raumschiff B?

94 S1: (lacht) Auch 18,3 m(?)

95 B: Tatsächliche Messungen haben ergeben, dass das Messgerät, das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt

96 immer eine kürzere Länge misst. Was meinst du dazu?

97 S1: Ja ... vielleicht irgendwie... wegen der Geschwindigkeit oder so, dass da irgendwas abgezogen wird

98 ... im System, weil eigentlich müsste das ja das gleiche sein.
 99 B: Also würdest du sagen, dass es nur bei der Messung ein Fehler ist?
 100 S1: Ja eben nicht unbedingt so ein Fehler, aber das muss man sicher irgendwie so ... irgendwas noch
 101 addieren, oder subtrahieren.
 102 B: Also du meinst das müsste man das berücksichtigen im Messprozess.
 103 S1: Ja.
 104 B: Der Messprozess ist tatsächlich bei einem perfekten Messgerät so aufgebaut, dass alles berücksichtigt
 105 wird, trotzdem misst es auf jedem Fall eine kürzere Länge, wenn es sich bewegt, relativ zur Bowlingbahn.
 106 S1: (lacht) Ja klarer Fall von Fehler.
 107 B: (lacht) Ok, ok. Jetzt haben wir den Fall, dass beide Messgeräte hier etwas Verschiedenes messen.
 108 S1: Mhm.
 109 B: Welche ... welches der Ergebnisse stimmt, oder sind beide richtig?
 110 S1: ... Ich hätt gesagt das von dort, wo die Bowlingbahn ist, weil das genauer ist, weil es so direkt ...
 111 daneben ist.
 112 B: Mhm, ok. ... Und schließlich haben wir natürlich auch auf unserer guten alten Erde...
 113 S1: Mhm.
 114 B: ... eine Bowlingbahn und auch hier ein Messgerät das die Länge misst. Wieder ein Raumschiff das sich
 115 mit 100.000 km/s vorbeibewegt an der Erde. Das Messgerät (auf der Erde; Anm.) misst wiederum eine
 116 Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Das Messgerät auf dem Raumschiff misst?
 117 S1: Die gleiche Länge, 18,3 m.
 118 B: Ok.
 119 S1: Ah so ne, ja jetzt kürzer, weil wegen diesem Fehler, oder ... halben Fehler. (lacht)
 120 B: Ok, ja. Tatsächliche Messungen werden immer eine kürzere Länge ergeben und du meinst das liegt
 121 woran?
 122 S1: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Wegen der Geschwindigkeit und irgendwelchen ... Abständen ... in
 123 der Physik von ... was weiß ich (lacht). B: (lacht) Was für Abstände, was meinst du damit?
 124 S1: Äh, ... vielleicht weil die ein bisschen weiter weg ist und halt nicht direkt neben...
 125 B: Also würdest du wieder sagen Messfehler.
 126 S1: Ja.
 127 B: Mhm. Und wenn jetzt eines, ist jetzt eines der Ergebnisse richtig, eines falsch, oder sind beide richtig?
 128 S1: Ja, ich hätt gesagt das (Ergebnis des Messgeräts auf der Erde; Anm.) ist richtig und das (Ergebnis
 129 des Messgeräts auf dem Raumschiff; Anm.) ist falsch. Also halt, ... nicht so falsch, aber wenn man es
 130 berücksichtigt, kommt man wahrscheinlich dann irgendwie auf das.
 131 B: Ok. Und was, wenn man es berücksichtigt und trotzdem eine kürzere Länge misst?
 132 S1: Ja dann hat man falsch gerechnet. (lacht)

Interview 2:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A. Das eine bewegt sich
 2 dahin, das andere dorthin, oder aber es bewegt sich nur B, oder nur A. Jedenfalls siehst du es bewegt sich
 3 an dir vorbei, Raumschiff B. Hast du irgendeine Möglichkeit, wenn nichts sonst sichtbar ist, keine Sterne,
 4 kein gar nichts, festzustellen, ob du dich bewegst, Raumschiff B sich bewegt, oder sich beide bewegen?
 5 S2: Ich wü... würde sagen auf der Erde hätt ich die Möglichkeit, im Weltall eher schwer weil wir ja keine
 6 Schwerkraft haben ... schwerelos sind.
 7 B: Mhm.
 8 S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Mir würde jetzt keine Idee einfallen.
 9 B: Tatsächlich ähm ... ist es so, dass man das auch überhaupt nicht feststellen könnte in der Situation. Wir
 10 bleiben bei den beiden. Wichtig ist offenbar nur wie schnell sie sich relativ zueinander bewegen, wir können
 11 ja gar nicht feststellen welcher sich bewegt und welcher nicht. Wir haben jetzt auf beiden Raumschiffen
 12 Messgeräte, die die Geschwindigkeit von Objekten exakt messen können. Raumschiff B bewegt sich mit
 13 100.000 km/s relativ zu Raumschiff A ... und auf Raumschiff B haben wir einen Passagier. Was misst
 14 das Messgerät für Geschwindigkeit für diesen Passagier auf Raumschiff B. Die befinden sich im gleichen

15 Raumschiff. Messgerät und Passagier.
16 S2: Können Sie die Frage bitte nochmal wiederholen?
17 B: Wir haben Messgeräte für die Geschwindigkeit, die exakt messen. Raumschiff B bewegt sich mit 100.000
18 km/s relativ zum Raumschiff A. Auf dem Raumschiff B sitzt auch ein Passagier. Welche Geschwindigkeit
19 wird dieses Geschwindigkeitsmessgerät auf Raumschiff B für den Passagier messen?
20 S2: Mhm. Und die Geschw... Geschwindigkeit in welcher sich B von A entfernt(..?)
21 B: Er misst nur die Geschwindigkeit des Passagiers, ...
22 S2: Ach so!
23 B: ... der sich auf dem gleichen Raumschiff wie es selbst befindet. ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Mit
24 anderen Worten: Wie schnell bewegt sich der Passagier relativ zum Geschwindigkeitsmessgerät?
25 S2: Ach so. ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... Was ist noch die Frage dazu?
26 B: Na die Frage ist was misst der (Messgerät auf Raumschiff B)? Wie schnell bewegt sich der (Passagier;
27 Anm.) relativ zum Messgerät?
28 S2: Ja wahrscheinlich die 100.000, diese, die 100.000 km/h.
29 B: Wir können es uns auch vorstellen aus einer Alltagssituation heraus. Man fährt mit dem Zug. Jetzt
30 übernimmst du die Rolle des Geschwindigkeitsmessgeräts. Du sitzt einfach im Zug und eine Reihe vor, die
31 sitzt auch jemand. Wie schnell würdest du meinen, wenn du nur hinschaust und jetzt mal gar nicht auf
32 die Bewegung des Zuges achtest sagen, dass sich der von dir entfernt?
33 S2: Gar nicht.
34 B: Wie schaut's dann hier aus? Wie entfernt sich der, wie schnell ist der im Vergleich, oder relativ zum
35 Messgerät?
36 S2: Genau gleich.
37 B: Was misst dann das Messgerät? ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Wenn er ... (Messgerät auf Raumschiff
38 B; Anm.) jetzt eine Geschwindigkeit misst, dann misst er ja wie schnell entfernt sich der (Passagier; Anm.)
39 von mir.
40 S2: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm. (lacht) ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Er misst wirklich nur
41 die Person?
42 B: Nur die Person, die da sitzt.
43 S2: Er kann ja nicht den Abstand zum anderen Raumschiff messen.
44 B: Das andere Raumschiff interessiert den gar nicht. Der misst nur die Geschwindigkeit relativ zu diesem
45 Passagier.
46 S2: ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... Dann weiß ich es nicht.
47 B: Würdest du mir glauben, wenn ich sage der (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) misst einfach null,
48 weil der (Passagier; Anm.) sich gar nicht von ihm entfernt?
49 S2: Ja.
50 B: Ok. Was würde aber jetzt der auf dem relativ dazu bewegten Raumschiff A für den Passagier messen?
51 S2: Ja äh ... ähm der würde wahrscheinlich die Geschwindigkeit vom Raumschiff bekommen, weil er sich
52 ja wegbewegt.
53 B: Ok, damit auch der Passagier. Unser Passagier muss in Richtung der Spitze von Raumschiff B gehen,
54 bewegt sich mit ungefähr 4 km/h, ganz gemütlich. Was misst das Messgerät auf Raumschiff B für die
55 Geschwindigkeit des Passagiers?
56 S2: Die 4km/h.
57 B: Und was wird das auf Raumschiff A messen? Wieder für den Passagier.
58 S2: Ich würde sagen die 100.000 km/h plus die 4 km/h.
59 B: Ok. Und jetzt ersetzen wir unseren Passagier. Wir haben eine Lampe hingestellt und die sendet Licht
60 in Richtung der Spitze von Raumschiff B aus. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche Ge-
61 schwindigkeit für das Licht misst dieses Messgerät auf Raumschiff B.
62 S2: Für das Licht, oder für die Lampe?
63 B: Für das Licht.
64 S2: Ja, die ... 300.000 m/s.
65 B: Und was wird das Messgerät auf Raumschiff A für das Licht messen?

66 S2: Ich würde wieder sagen die 100.000 km/h plus die 300.000 m/s.
67 B: Kilometer.
68 S2: Ja.
69 B: Ok. Jetzt haben wir auch eine Lampe auf Raumschiff A. Das Licht bewegt sich in Richtung Heck von
70 Raumschiff A. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A in die gleiche Richtung. Welche Ge-
71 schwindigkeit für das Licht misst das Messgerät auf Raumschiff A?
72 S2: Raumschiff A bewegt sich aber nicht.(?)
73 B: Ob es sich bewegt oder nicht wissen wir nicht, wir wissen nur wie sie sich zueinander bewegen.
74 S2: Ah so, ok.
75 B: Was misst das Gerät auf Raumschiff A für das Licht, das hier bei Raumschiff A ausgesandt wird?
76 S2: Die Lichtgeschwindigkeit.
77 B: Ok. Und was misst das Gerät auf Raumschiff B für dieses Licht? (5 Sekunden Pause; Anm.) Licht
78 bewegt sich dahin, Raumschiff (B; Anm.) bewegt sich dahin.
79 S2: ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... Ah so, wieder die ... äh, hm ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm
80 die äh Lichtgeschwindigkeit abz ... äh, äh Lichtgeschwindigkeit abzüglich der, der Raumschiffgeschwin-
81 digkeit.(?)
82 B: Würde jedenfalls Sinn machen. Jetzt haben Experimente in der Realität, die man seit über 100 Jahren
83 durchführt, ergeben: Egal wie sich das Messgerät im Verhältnis zur Lichtquelle bewegt, es wird immer
84 Lichtgeschwindigkeit messen, ohne irgendeine Veränderung. Was sagst du dazu?
85 S2: Ergibt jetzt mal nicht so viel Sinn, auf den ersten Blick.
86 B: Ja, ... ok. Wir haben unsere Messgeräte jetzt ersetzt. Jetzt befinden sich hier Messgeräte die exakt
87 messen können, ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Wieder bewegen sich die Raum-
88 schiffe relativ zueinander mit 100.000 km/h ... und wir haben zwei Fernseher auf Raumschiff B, F1 und
89 F2. Die werden eingeschaltet. Das Messgerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet
90 werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff A?
91 S2: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... (räuspert sich) Weil es sich nach Richtung links bewegt würde ich
92 mal vom logischen Verständnis sagen, dass es misst, dass zuerst F1 eingeschaltet wird, nach dem, was Sie
93 vorhin aber schon zur Relativitätstheorie erklärt haben vermute ich aber, dass es trotzdem beide, misst
94 dass beide gleichzeitig eingeschaltet werden.
95 B: Ok, aber so dein Bauchgefühl wäre einmal, der würde, das misst den (F1; Anm.) zuerst ...
96 S2: F1 zuerst.
97 B: Ähm du würdest sagen es gibt prinzipiell eine Möglichkeit, dass der hier (Messgerät in Raumschiff A;
98 Anm.) misst, dass sie nicht gleichzeitig eingeschaltet werden und woran würde das liegen, wenn er das
99 misst?
100 S2: Weil sich ... weil sich A ja von mir aus nach links bewegt und F1 links ist von F2.
101 B: Mhm.
102 S2: Deshalb ist er (F1; Anm.) ja näher zum Messgerät...
103 B: Mhm
104 S2: ... und das ...
105 B: Ok und wenn das Messgerät das berücksichtigen würde?
106 S2: Ja dann würde es messen das beide gleichzeitig eingeschaltet sind.
107 B: Ok. Dann haben wir noch zwei weitere Fernseher auf diesem Raumschiff (B; Anm.), der Rest der Si-
108 tuation ist gleich ... und die werden wieder beide eingeschaltet. Diesmal misst das Gerät auf Raumschiff
109 A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff B?
110 S2: ... (15 Sekunden Pause; Anm.) ... (räuspert sich) Ich würde sagen, dass F4 früher eingeschaltet wird.
111 B: Wie kommst du zu dieser Überzeugung?
112 S2: Weil es be-, A bewegt sich eben von mir aus Richtung links ...
113 B: Mhm.
114 S2: ... also würde es – bekommt es die Signale von F3 früher, also muss eben F4 früher eingeschaltet sein,
115 damit die Signale gleichzeitig ankommen.
116 B: Ok. Nehmen wir an die Messgeräte berücksichtigen die Signallaufzeit und werten nachher aus was war

117 gleichzeitig, was nicht. Was würde dann deine Antwort sein.
118 S2: Ja dann würden, würd ... das Messgerät in B auch, auch messen, dass sie gleichzeitig eingeschaltet
119 werden.
120 B: Ok. Jetzt ist es so, dass man auch sowas experimentell überprüft hat, in der Realität, nicht unbedingt
121 mit Raumschiffen und es stellt sich heraus: Zwei Ereignisse, die im Raumschiff B gleichzeitig stattfinden
122 finden im Raumschiff A, das sich relativ dazu bewegt sicher nicht gleichzeitig statt und umgekehrt auch.
123 Was sagst du dazu?
124 S2: Ergibt jetzt mal irgendwie Sinn, weil die Fernseher nicht auf der gleichen Höhe sind, aber ... trotzdem
125 spannend, weil ich dachte, dass die Geräte das berücksichtigen könnten ...
126 B: Das Gerät berücksichtigt die Signallaufzeit.
127 S2: Aber trotzdem wird es nicht gleichzeitig gemessen.(?)
128 B: Trotzdem wird es nicht gleichzeitig.
129 S2: Das ist jetzt wieder komisch.
130 B: Ok. Jetzt haben wir noch eine Situation, bei der wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte haben die
131 Längen exakt messen können, ... die auch wieder wie im vorigen Beispiel alle möglichen Bewegungen und
132 so berücksichtigen ... und Raumschiff B bewegt sich wieder relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s.
133 Es befindet sich eine Bowlingbahn auf Raumschiff B und das Messgerät auf Raumschiff B misst dafür eine
134 Länge von 18,3 m. Was für eine Länge wird das Messgerät auf Raumschiff A messen?
135 S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Da es sich um eine Länge handelt würde ich einfach, würde ich auch
136 sagen 18, 3m.
137 B: Ok. Wie meinst du das „da es sich um eine Länge handelt“?
138 S2: Ja es ... würde sich jetzt für mich so anhören als wäre es, ist es egal ob es sich das jetzt in die eine
139 Richtung weiterbewegt oder nicht, weil es ja eine Länge ist, die sich nicht verändert.
140 B: Ok ... und auch auf Raumschiff A haben natürlich die Passagiere eine Bowlingbahn zur Verfügung und
141 hier misst das Messgerät auf Raumschiff A eine Länge von 18,3 m. Was misst das Gerät auf Raumschiff
142 B?
143 S2: Ich würde bei meiner Meinung bleiben, wieder 18,3 m sagen.
144 B: Ok. Jetzt haben Messungen in der Realität ergeben ... und zwar wieder unter Berücksichtigung aller
145 möglichen Laufzeiteffekte oder sowas, dass das relativ zur Bowlingbahn bewegte Messgerät immer eine
146 kürzere Länge misst, für die Bowlingbahn.
147 S2: Ok. (lacht)
148 B: Was sagst du dazu?
149 S2: Ja ergibt wieder mal ... nicht so viel Sinn. (lacht)
150 B: Zunächst einmal, ja. Ok. Jetzt ist es halt so, dass beide Messgeräte jetzt einen unterschiedlichen Wert
151 für die Bowlingbahn anzeigen – 18,3 m und hier (auf Raumschiff B; Anm.) was Kürzeres.
152 S2: Ja.
153 B: Würdest du sagen es gibt jetzt einen richtigen und einen falschen Wert? (3 Sekunden Pause; Anm.)
154 Welcher wäre welcher, oder haben beide recht?
155 S2: Ich würde grundsätzlich den der bei de, ... bei der Bowlingbahn ist, am selben Raumschiff als, als
156 richtig ansehen für uns auf der, für uns zumindestens. Aber ich vermute der andere Messwe-, also andere
157 Wert hat auch seine Richtigkeit, weil halt, wird halt irgendwie ... irgendwas anderes noch miteinbezogen
158 in diese Messung.
159 B: Was meinst du?
160 S2: Irgendwelche anderen Parameter, irgendeine Relativitätstheorie, irgendwas wird da miteinbezogen.
161 B: Ok. Zu guter Letzt sind wir natürlich sehr froh, dass es auch auf der Erde Bowlingbahnen gibt und
162 auch hier kann man natürlich die Länge messen. Relativ zur Erde bewegt sich hier ein Raumschiff vorbei
163 mit 100.000 km/s. Die Bowlingbahn hat eine Länge von 18,3 m, zumindest sagt dieses Messgerät (auf der
164 Erde; Anm.) das. Was sagt das Messgerät auf dem Raumschiff, das sich vorbeibewegt?
165 S2: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... (räuspert sich) Ich schwank grad zwischen zwei Werten.
166 B: Welche?
167 S2: Entweder sind diesmal wirklich die 18,3 ...

168 B: Mhm.
 169 S2: Ah nein die Erde bewegt sich ja auch! Es ist ja mit... mitberücksichtigt(?.)
 170 B: Wichtig ist nur wie sie sich relativ zueinander bewegen.
 171 S2: Ach so.
 172 B: Oder meinst, was meinst du mit „die Bewegung der Erde“?
 173 S2: Weil ich hab's ja grad gesagt, dass die ... Erde sich ja nicht bewegt, aber ... die Erde bewegt sich ja
 174 auch.
 175 B: Mhm.
 176 S2: Ja ich würde wieder sagen, dass das Raumschiff die ... den, äh, einen anderen Wert misst.
 177 B: Welchen? Länger? Kürzer?
 178 S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... So wie's das ... andere Raumschiff... Wie war's im anderen Beispiel?
 179 B: Da hat das relativ zur Bahn bewegte Messgerät eine kürzere Länge gemessen. Und hier ist auch wieder
 180 relativ zur Bahn auf dem Raumschiff das bewegte Messgerät.
 181 S2: Logisch wär's jetzt mal, wenn's auch das kürzere messen würde.
 182 B: Ok und würdest du sagen hier gibt's einen richtigen und einen falschen Wert?
 183 S2: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Für uns wär wieder, für uns wär der ... Wert vom Messgerät der
 184 richtige, weil wir eben auf der Erde, vom Messgerät auf der Erde wär's der richtige, weil wir auf der Erde
 185 leben und ... das halt unsere Werte sind mit denen wir leben, aber ... der vom Raumschiff würde auch
 186 irgendwie wieder seine Richtigkeit haben.
 187 B: Mhm. Ähm, könnten sich die irgendwie einigen, die am Raumschiff und die auf der Erde, oder ist das
 188 ein unüberbrückbarer Konflikt, wie lang diese Bowlingbahn ist?
 189 S2: Ich würde jetzt so mal keine Einigung sehen, man müsste halt ... irgendwas ... rausfinden.
 190 B: Mhm. Und würdest du jetzt sagen von außen betrachtet, wenn man von außen auf die Situation schaut,
 191 welcher der beiden Werte wäre, eher der richtige?
 192 S2: Ja, der bei der Bowlingbahn.
 193 B: Ok.

Interview 3:

1 B: Wir betrachten jetzt mal zwei Raumschiffe A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A und siehst,
 2 dass relativ zu Raumschiff B du dich bewegst, oder aber auch Raumschiff B sich bewegt. Wir haben keinen
 3 Sternenhintergrund, wir sehen nichts als nur die beiden Raumschiffe. Kannst du irgendwie feststellen, ob
 4 du dich bewegst, oder Raumschiff B sich bewegt?
 5 S3: ... Hm, naja, ich mein ... normalerweise würd man halt aus dem Fenster raus schauen und schauen
 6 ob sich das andere Schiff wegbewegt, also, ah, ..., also wir sehen im Hintergrund nichts(?.)
 7 B: Nichts, nein, wir sehen nur das andere Raumschiff.
 8 S3: (3 Sekunden Pause; Anm.) Ja sobald das Raumschiff halt weg ist würd ich sagen, dass einer von uns
 9 sich bewegt hat, aber ich, ich glaub nicht, dass man feststellen kann wer ... ähm sich bewegt hat von den
 10 beiden.
 11 B: Genauso ist es tatsächlich. Das Einzige was man feststellen kann ist wie schnell sind wir im Verhältnis
 12 zueinander, die sogenannte Relativgeschwindigkeit. Deshalb berücksichtigen wir jetzt immer nur eine Be-
 13 wegung, weil es ja sowieso egal ist, wer sich bewegt. Wir haben wieder die beiden Raumschiffe und auf
 14 jedem davon ein Messgerät, das Geschwindigkeiten ganz exakt messen kann. Das Raumschiff B bewegt sich
 15 jetzt relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s. Im Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwin-
 16 digkeit misst denn das ... auf Raumschiff B sich befindende Messgerät für diesen Passagier, ... der dort
 17 sitzt?
 18 S3: Von dem Passagier?
 19 B: Von dem Passagier. Das steht quasi hinter dem Passagier und misst, wie schnell der ist.
 20 S3: Ja der Passagier ist glaub ich gar nicht schnell, oder(?.) Nur ...
 21 B: Wenn er sitzt.
 22 S3: ... nur das Raumschiff.
 23 B: Ja, also würd-, was würdest du sagen was misst das Gerät jetzt für ihn?

24 S3: Ja, null m/s.

25 B: Null, ja. ... Und was wird das Gerät auf Raumschiff A für den Passagier messen?

26 S3: Eben diese 100.000 ... m/s.

27 B: Ok. Unser Passagier steht ... auf, der möchte in Richtung der Spitze des Raumschiffs gehen. Was,

28 oder der bewegt sich dabei ganz gemütlich, wie im Alltag mit 4 km/h. Was misst dieses Messgerät auf

29 Raumschiff B jetzt für seine Geschwindigkeit.

30 S3: Ich glaub die 4 km/h(.?)

31 B: Ok. Und was wird das Gerät auf Raumschiff A messen?

32 S3: Ich glaub wieder die 100.000 von vorher, weil er sich ja mit dem Raumschiff bewegt, oder(.?)

33 B: Mhm und die 4 km/h die er noch geht, spielen die eine Rolle?

34 S3: Ich glaub nicht ... ich glaub nur, dass, dass also ich glaub, dass nur das Raumschiff gemessen wird,

35 weil er sich ja drinnen befindet und ich glaub das Geschwindigkeitsmessungsgerät, das misst nur die Ge-

36 schwindigkeit von dem außen, also, also kann man im anderen Raumschiff ...

37 B: Na er möchte tatsächlich wissen wie schnell bewegt sich der (Passagier in Raumschiff B; Anm.) relativ

38 zu mir.

39 S3: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... Keine Ahnung. (lacht) Ok.

40 B: Hast du schon mal gesehen, dass ein Zug fährt, so langsam an dir vorbei und drinnen geht noch jemand

41 in Richtung des Zuges. Ist der dann relativ zu dir so schnell wie der Zug, oder sogar noch ein bisschen

42 schneller?

43 S3: Noch schneller eigentlich.

44 B: Wie wäre das dann hier? ... Ist ja an sich eine ähnliche Situation. Raumschiff bewegt sich und der

45 bewegt sich auch noch in Richtung Raumschiff.

46 S3: Würde man das dann einfach zusammenrechnen, die Geschwindigkeiten(.?)

47 B: Inwiefern zusammenrechnen?

48 S3: Also, dass man ... quasi die Geschwindigkeit von außen misst und die von innen und dann zusammen,

49 also, rechnen.

50 B: Das würde jedenfalls sinnvoll sein, ja. Jetzt ersetzen wir unseren Passagier. Wir haben hier eine Lampe

51 auf Raumschiff B, die in Richtung der Spitze von Raumschiff B leuchtet. Licht bewegt sich mit ungefähr

52 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät auf Raumschiff B für das Licht?

53 S3: 300.000 m/s(.?)

54 B: Und welche misst das Gerät auf Raumschiff A für dieses Licht?

55 S3: Die Geschwindigkeit mit der sich das Raumschiff bewegt und die von dem Licht der Lampe zusam-

56 mengerechnet(.?)

57 B: Ja. Und schließlich haben wir auch auf Raumschiff A eine Lampe, die leuchtet hier in Richtung Heck,

58 also in die gleiche Richtung, in die sich auch Raumschiff B bewegt. Welche Geschwindigkeit misst das

59 Gerät auf Raumschiff A für das Licht? (5 Sekunden Pause; Anm.) Von der Lampe hier ausgesandt wird.

60 S3: Wieder die 300.000.

61 B: Mhm. Was wird das Messgerät auf Raumschiff B für das Licht messen?

62 S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Wieder zusammengerechnet? ...

63 B: Ok. Messungen haben jetzt ergeben, die man schon seit über 100 Jahren durchführt, dass ... egal wie

64 sich das Messgerät und die Lichtquelle relativ zueinander bewegen das Messgerät immer exakt Lichtge-

65 schwindigkeit messen wird. Was sagst du dazu?

66 S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Das heißt nicht zusammengerechnet, einfach nur ...

67 B: In dem Fall nicht zusammengerechnet.

68 S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Das macht ja keinen Sinn, also man sieht's ja nicht so, man sieht's ja

69 viel ... schneller ...

70 B: Mhm. Also, findest du das irgendwie nachvollziehbar, oder völlig ...

71 S3: Nein. (lacht)

72 B: Ist einfach nur seltsam?

73 S3: Jaa. (lacht)

74 B: Ok. Gut. So, bisschen andere Situation. Bewegen sich wieder relativ zueinander mit 100.000 km/s.

75 Wir haben jetzt Messgeräte auf beiden Raumschiffen, die exakt messen können, ob Ereignisse gleichzeitig
76 stattfinden können. Auf Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2, die werden eingeschaltet. Das
77 Messgerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Messgerät auf
78 Raumschiff A?

79 S3: Dass ... auch gleich eingeschalten werden, also gleichzeitig(??)

80 B: Mhm. Und würdest du sagen es gibt irgendeine Möglichkeit, dass dieses Gerät etwas Anderes messen
81 würde?

82 S3: Ich glaub eigentlich nicht, weil wenn es, wenn es ... so wie vorher ist, dass die Geschwindigkeit einfach
83 gleichbleibt, dann glaub ich, dass das auch ... einfach anzeigt, dass sie gleichzeitig eingeschalten werden.

84 B: Ok. Wir haben jetzt ... noch zwei Fernseher hier, F3 und F4. Diesmal misst das Messgerät auf Raum-
85 schiff A die werden gleichzeitig eingeschaltet. Was wird das Gerät auf Raumschiff B messen?

86 S3: Dass sie gleichzeitig eingeschalten wurden.

87 B: Und würdest du auch hier sagen es gibt irgendeine Möglichkeit, dass da was anderes rauskommt?

88 S3: Ich glaub nicht. Wenn sie's genau anzeigen, dann nicht.

89 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass Ereignisse, die auf Raumschiff B gleichzeitig stattfinden auf
90 Raumschiff A, das sich relativ dazu bewegt, sicher nicht gleichzeitig stattfinden und umgekehrt. Was sagst
91 du dazu?

92 S3: Ja macht keinen Sinn schon wieder. (lacht)

93 B: (lacht)

94 S3: (flüstert)

95 B: Bitte?

96 S3: Das, das versteh ich nicht. (lacht)

97 B: Ok. Schließlich haben wir auf beiden Raumschiffen noch Geräte die Längen ganz exakt messen können.
98 Raumschiff B bewegt sich wieder relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s. Auf Raumschiff B gibt's eine
99 Bowlingbahn und das Messgerät auf Raumschiff B misst für diese Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m.
100 Was misst das Gerät auf Raumschiff A für die Länge der Bowlingbahn?

101 S3: 18,3 m(??)

102 B: Ok. ... Auch die Passagiere auf Raumschiff A dürfen sich über eine Bowlingbahn freuen und das Mess-
103 gerät auf Raumschiff A misst für diese eine Länge von 18,3 m. Was misst das Gerät auf Raumschiff B?

104 S3: 18,3 m. (lacht)

105 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass das Messgerät, das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt
106 immer eine kürzere Länge misst, bei perfekter Messung. Was sagst du dazu?

107 S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Mmm ... wieso misst das eine kürzere, weil die sind, ja ... das ist
108 quasi einfach nur vertauscht. So ...

109 B: Mhm.

110 S3: Aber beide in die Richtung.

111 B: Also sie bewegen sich relativ zueinander ... und das was jetzt wesentlich ist, hier misst das Messgerät
112 (auf Raumschiff B; Anm.) das sich zu ... dieser Bowlingbahn bewegt eine kürzere Länge als das hier
113 (auf Raumschiff A; Anm.). In der oberen Situation misst auch das Messgerät, das sich relativ zu dieser
114 Bowlingbahn (auf Raumschiff B; Anm.) bewegt eine kürzere Länge als das da (Messgerät auf Raumschiff
115 B; Anm.).

116 S3: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... Das (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) misst eine kürzere Länge?

117 B: Mhm.

118 S3: Vielleicht weil sich das, ja, daran bew-, vorbeibewegt und das, äh, im Raumschiff selber ist, vielleicht
119 liegt das daran?

120 B: Was könnt's dann ... was könnte dann dazu führen?

121 S3: Naja, dass die Geschwindigkeit vielleicht dann ... ?

122 B: Was für einen Effekt könnte denn die Geschwindigkeit haben?

123 S3: Bitte?

124 B: Was für einen Effekt könnte denn die Geschwindigkeit haben?

125 S3: Vielleicht, dass die Bahn quasi verzerrt wird, weil sie sich da so ... bewegt. (lacht)

126 B: Ok, und ... wenn wir jetzt eben verschiedene Messwerte von beiden Geräten haben, du hast jetzt
 127 ja auch schon erklärt, wie's möglicherweise dazu kommen könnte, würdest du dann sagen es gibt einen
 128 richtigen und einen falschen Wert?
 129 S3: Naja, ich glaube nicht, weil ... jedes Messgerät misst halt das was es quasi aufnimmt, das ist ...
 130 B: Aber wenn die sich jetzt einigen müssen welche Länge hat die Bowlingbahn.
 131 S3: Na dann glaub ich, dass das Messgerät, das in dem Raumschiff mit der Bowlingbahn ist, das richtige
 132 ist.
 133 B: Mhm. Das heißt du würdest sagen das von dem ist aufgrund von Verzerrung ein Fehler.
 134 S3: Ja.
 135 B: Ok. Auf der Erde gibt's auch eine Bowlingbahn und auch so ein Messgerät das Längen exakt misst.
 136 Und auch an der Erde bewegt sich wieder ein Raumschiff mit 100.000 km/s vorbei. Das Messgerät auf der
 137 Erde misst – wieder mal – eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Was wird dieses Messgerät auf dem
 138 Raumschiff messen?
 139 S3: Ähm, eine kürzere Länge.(?)
 140 B: Und ... hätte einer der beiden recht, gibt's einen richtigen und einen falschen Wert, oder haben beide
 141 recht?
 142 S3: Ich glaub die ... das Messgerät auf der Erde ist richtig.(?)
 143 B: Und weil?
 144 S3: Ja weil das eben ... nicht durch die Geschwindigkeit verzerrt würde, also von dem her.
 145 B: Mhm, ok.

Interview 4:

1 B: Zunächst einmal betrachten wir zwei Raumschiffe, A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A, außer
 2 Raumschiff B ist nichts sichtbar, keine Sterne, kein gar nix.
 3 S4: Mhm.
 4 B: Du siehst, ihr bewegt's euch relativ zueinander. Kannst du irgendwie feststellen wer sich bewegt, oder
 5 ob sich sogar beide bewegen?
 6 S4: Nein.
 7 B: Geht tatsächlich nicht, ja. Das Einzige was in solchen Situationen wichtig ist, wie schnell bewegen sie
 8 sich relativ zueinander.
 9 S4: Mhm.
 10 B: So, jetzt haben wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die die Geschwindigkeit von Objekten exakt
 11 messen können. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s. Auf Raumschiff B,
 12 also im Raumschiff B sitzt ein Passagier. Was misst das Messgerät in Raumschiff B für die Geschwindigkeit
 13 des Passagiers?
 14 S4: Wie schnell das Raumschiff fährt ... fliegt.
 15 B: Wenn du dir das vorstellst, wenn du im Zug sitzt und in der Reihe vor dir sitzt noch jemand, wie schnell
 16 bewegt sich der relativ zu dir?
 17 S4: Gleich ... heißt, dieselbe.
 18 B: Entfernt sich der von dir, oder gar nicht?
 19 S4: Nein.
 20 B: Und genau das messen wir ja am Ende des Tages, wie wie-, wie schnell entfernt sich der vom Messgerät.
 21 S4: Mhm.
 22 B: Also, was misst dieses Messgerät (auf Raumschiff B; Anm.) für die Geschwindigkeit des Passagiers, der
 23 da sitzt?
 24 S4: Die Entfernung.
 25 B: Na welche Geschwindigkeit misst der?
 26 S4: Vom Passagier.
 27 B: Ja und wie schnell ist das? Für einen sitzenden Passagier?
 28 S4: So schnell wie das Raumschiff.
 29 B: Aber jetzt würdest du doch sagen, wenn jemand im Zug vor dir sitzt und der Zug fährt mit 200 km/h

30 Richtung Wien ...

31 S4: Würd der Passagier nicht mit 200 km/h fahren.

32 B: Aus deiner Sicht, wo du hinter im sitzt, würd er sich nicht so schnell von dir entfernen, oder?

33 S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... heißt der Passagier hat gar keine Geschwindigkeit.

34 B: Nachdem er sitzt, würde dieses Messgerät also messen ... der bewegt sich nicht.

35 S4: Mhm.

36 B: Der sitzt. Was misst hingegen das Messgerät in Raumschiff A für seine Geschwindigkeit?

37 S4: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... einmal das was das Raumschiff (B; Anm.) fährt plus das was Raum-

38 schiff A fährt.(?)

39 B: Das ist ... die Relativgeschwindigkeit, die gibt schon genau an wie sie sich relativ zueinander insgesamt

40 bewegen, würde also beide Bewegungen berücksichtigen.

41 S4: Ja.

42 B: Also wir haben da 100.000 km/s, ... welche Geschwindigkeit misst jetzt das Gerät (auf Raumschiff A;

43 Anm.) für diesen Passagier, der sitzt?

44 S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... die 100.000 ... m/s.

45 B: Ok. Unser Passagier hat sich entschieden aufzustehen und gemütlich mit 4 km/h Richtung der Spitze

46 des Raumschiffs (B; Anm.) zu gehen. Welche ... welchen Wert misst jetzt ... das Messgerät in Raumschiff

47 B für seine Geschwindigkeit?

48 S4: 4 km/h.

49 B: Und das a-, im Raumschiff A?

50 S4: Für den Passagier?

51 B: Für den Passagier.

52 S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) die 1.000 m/s plus die 4 km/h.

53 B: Ok. Und ... jetzt ersetzen wir unseren Passagier durch eine Lampe. Die Lampe leuchtet in Richtung

54 Spitze von Raumschiff B. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s.

55 S4: Mhm.

56 B: Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät in Raumschiff B für das Licht?

57 S4: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... also rein logisch Lichtgeschwindigkeit.

58 B: 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst jetzt das Gerät in Raumschiff A für das Licht?

59 S4: Die Lichtgeschwindigkeit plus ... das ... wie schnell das Raumschiff fährt.

60 B: Ok. Es befindet sich jetzt auf Raumschiff A eine Lampe, die leuchtet in Richtung Heck von Raumschiff

61 A, also in die gleiche Richtung, in die sich auch Raumschiff B relativ dazu bewegt.

62 S4: Mhm.

63 B: Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät in Raumschiff A für das Licht?

64 S4: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... die Lichtgeschwindigkeit minus dem was ... Raumschiff A fährt.

65 B: Aber die (Messgerät und Lichtquelle; Anm.) befinden sich ja im gleichen Raumschiff.

66 S4: Dann nur die Lichtgeschwindigkeit.

67 B: Und was würde der in Raumschiff B für das Licht messen?

68 S4: Die Lichtgeschwindigkeit minus ... dem Raumschiff, was aber keinen Sinn ergibt, weil das Raumschiff

69 nicht rückwärtsfährt.

70 B: Naja das is ja egal, es kann sich ja, es kann ja auch der (Raumschiff B; Anm.) stehen und sich der

71 (Raumschiff A; Anm.) vorwärtsbewegen ...

72 S4: Mhm.

73 B: ... dann bewegt er sich auch in die gleiche Richtung wie das Licht.

74 S4: Mhm.

75 B: Gibt es ja verschiedene Möglichkeiten. Ok. Tatsächlich macht man Messungen für Lichtgeschwindigkeit

76 seit über 100 Jahren und das Ergebnis ist mit ... überwältigender Genauigkeit, egal wie schnell sich das

77 Messgerät relativ zur Lichtquelle bewegt, es wird immer genau die Lichtgeschwindigkeit messen. Was sagst

78 du dazu?

79 S4: Komisch. (lacht)

80 B: Komisch, oder? Ja?

81 S4: Ja. ... ergibt wenig Sinn.

82 B: Ok.

83 S4: (lacht)

84 B: Gut. Wir haben ... wieder eine ähnliche Situation, Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B

85 mit 100.000 km/s. Auf beiden Raumschiffen befinden sich Messgeräte, die exakt messen können, ob zwei

86 Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Es gibt auf Raumschiff B zwei Fernseher, F1 und F2, die

87 werden eingeschaltet. Das Messgerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.

88 Was misst das Gerät auf Raumschiff A?

89 S4: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... also ... bis die Messung beim ... Messgerät ankommt von F2 dau-

90 ert's halt bisschen länger, weil der weiter entfernt ist ... und ... weil sich Raumschiff A auch wegbewegt

91 ist da wahrscheinlich dann ... ein kleiner Zeitunterschied(??)

92 B: Ok. Und ... das, äh, wissen natürlich auch die Konstrukteure des Messgeräts und die haben das so

93 konstruiert, dass es das berücksichtigt.

94 S4: Mhm.

95 B: Sammelt alle Daten und wertet dann aus, was das gleichzeitig, oder nicht.

96 S4: Mhm.

97 B: Was würde es dann anzeigen?

98 S4: Gleichzeitig(??)

99 B: Ok. Wir haben noch zwei Fernseher auf Raumschiff B, F3 und F4. Diesmal misst das Messgerät auf

100 Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Messgerät auf Raumschiff B?

101 S4: ... auch, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden?

102 B: Und würdest du sagen es gibt überhaupt eine Möglichkeit, dass es was anderes misst?

103 S4: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... kaum, ... also ...

104 B: Kaum, ja?

105 S4: ... sehr gering wäre der Unterschied zwischen den beiden wegen der Entfernung(??) Aber wenn der das

106 wieder ... mitberechnet ... ist ... ist gleichzeitig.

107 B: Ok, also du würdest sagen, ... wenn, dann wäre's ein Messfehler.

108 S4: Ja.

109 B: Ok. In der Realität hat man – wenn auch nicht mit Raumschiffen – auch solche Dinge gemessen und man

110 ... stellt fest, wenn zwei Ereignisse auf Raumschiff B gleichzeitig stattfinden, finden sie auf Raumschiff A

111 sicher nicht gleichzeitig statt, wenn es sich relativ dazu bewegt ... und umgekehrt das Gleiche. Was sagst

112 du dazu?

113 S4: Obwohl ... das Messgerät ... sozusagen ...

114 B: Wenn's perfekt misst und alles berücksichtigt – trotzdem ... kommt was anderes raus.

115 S4: Öh ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... hat wahrscheinlich irgendwas mit zeitlicher Abfolge oder so zu

116 tun, keine Ahnung.

117 B: Wie meinst du das?

118 S4: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... dadurch, dass ... sich das ... dazwischen vergeht ja eine gewisse

119 Zeit und vielleicht hat das dann irgendwie einen Effekt darauf?

120 B: Mhm.

121 S4: Und deswegen ... kommt dort irgendwas anderes raus?

122 B: Ja, jedenfalls interessant, da weiter nachzubooren, warum. Ok. Dann haben wir noch einmal die gleiche

123 Ausgangssituation, Raumschiff B bewegt sich mit 100.000 km/s relativ zu Raumschiff A und diesmal gibt's

124 auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Längen exakt messen.

125 S4: Mhm.

126 B: Auf Raumschiff B haben wir eine Bowlingbahn. Und das Messgerät auf Raumschiff B misst für diese

127 Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Welche Länge misst das Messgerät auf Raumschiff A ... für die

128 Länge?

129 S4: Also wahrscheinlich eine andere. (lacht)

130 B: Wie kommst du zu dem Schluss?

131 S4: Weil's bis jetzt immer so war. (lacht)

132 B: Ok, aber was wär jetzt da dein Bauchgefühl dazu?
 133 S4: Ähm ... rein logisch gesehen wär es ja dieselbe Länge.
 134 B: Mhm. Und ... jetzt haben wir auch auf Raumschiff A eine Bowlingbahn. Das Messgerät auf Raumschiff
 135 A misst eine Länge von 18,3 m für diese Bowlingbahn. Welche Länge misst das Gerät auf Raumschiff B?
 136 S4: ... logisch gesehen wieder dieselbe, aber wahrscheinlich sagt er jetzt ... länger(?.)
 137 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass das Messgerät, das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt
 138 immer eine kürzere Länge misst.
 139 S4: Mhm.
 140 B: Was sagst du dazu?
 141 S4: ... ergibt wieder keinen Sinn. (lacht)
 142 B: Ok. Jedenfalls ... haben wir jetzt zwei Messgeräte die uns verschiedene Werte anzeigen.
 143 S4: Ja.
 144 B: Gibt's da jetzt einen richtigen und einen falschen Wert, oder haben beide Recht?
 145 S4: Beide haben Recht(?.)
 146 B: Und wenn's jetzt – ja bitte?
 147 S4: Weil ... wir haben auch schon in Physik klassische und Quantenphysik, vielleicht is ... das eine in der
 148 klassischen richtig und das andere in der Quantenphysik?
 149 B: Ok, ok. Und ... wenn sie jetzt miteinander kommunizieren müssten über das E-, über die Länge der
 150 Bowlingbahn ... könnten sie sich da irgendwie einigen, oder ...?
 151 S4: Nein.
 152 B: Ok. Zu guter Letzt betrachten wir noch eine ... Bowlingbahn, die sich auf der Erde befindet und
 153 auch dort haben wir ein Messgerät, das die Länge exakt bestimmen kann. An der Erde bewegt sich ein
 154 Raumschiff mit 100.000 km/s vorbei. Das Messgerät auf der Erde misst eine Länge von 18,3 m für die
 155 Bowlingbahn. Welche Länge misst das Gerät auf dem Raumschiff?
 156 S4: Die Erde dreht sich auch ... heißt ...
 157 B: Aber nicht sehr schnell.
 158 S4: Ja.
 159 B: (lacht)
 160 S4: ... heißt wahrscheinlich wieder kürzer(?.) Eine kürzere Länge?
 161 B: Und ... wie würd's da jetzt ausschauen, gäb's da jetzt einen richtigen und einen falschen Wert, oder
 162 haben beide Recht?
 163 S4: Ich hätt' gesagt wieder haben beide recht, heißt das is ... so ziemlich das Gleiche wie bei den Raum-
 164 schiffen.
 165 B: Ok. ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja und du würdest meinen die Ergebnisse existieren quasi ...
 166 nebeneinander?
 167 S4: Ja.
 168 B: Ok.

Interview 5:

1 B: Wir haben zwei Raumschiffe, A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A und siehst ... offensichtlich
 2 bewegst du dich relativ zum Raumschiff B, oder umgekehrt. Wir haben keinen Sternenhintergrund, keine
 3 Planeten, nichts als Referenz, wir sehen nur das andere Raumschiff.
 4 S5: Mhm.
 5 B: Hast du irgendeine Möglichkeit festzustellen, ob du dich bewegst, das andere Raumschiff, oder vielleicht
 6 sogar beide?
 7 S5: Ahm, nein würd ich nicht sagen.
 8 B: In solchen Situationen ist nur die Relativgeschwindigkeit entscheidend. Das heißt, wenn man die Ge-
 9 schwindigkeit anschaut, wer bewegt sich wohin wie schnell, aber es ist nicht wichtig wer sich eigentlich
 10 bewegt. Und genau bei so einer Situation bleiben wir gleich. Raumschiff B bewegt sich relativ zum Raum-
 11 schiff A mit 100.000 km/s und auf beiden Raumschiffen sind Messgeräte, die Geschwindigkeiten exakt
 12 messen können. Auf Raumschiff B sitzt ein Passagier.

13 S5: Mhm.

14 B: welche Geschwindigkeit misst denn ... das Messgerät für diesen sitzenden Passagier? Das Messgerät

15 das sich auf Raumschiff B, also ... beim Passagier befindet.

16 S5: Ahm, naja dieselbe Geschwindigkeit wie das Raumschiff fliegt, also 100.000 km/s.

17 B: Wenn du dir die Situation vorstellst wie du im Zug sitzt und vor dir sitzt noch jemand. Was würdest

18 du sagen, wie schnell bewegt sich der relativ zu dir?

19 S5: Also relativ zu mir, ahm ... gar nicht.

20 B: Ok. Gemessen wird nämlich immer die Relativgeschwindigkeit zwischen Messgerät und dem was gemessen wird.

21

22 S5: Hm.

23 B: Welche Geschwindigkeit würde dieses Messgerät (auf Raumschiff B; Anm.) dann für den Passagier messen?

24

25 S5: Na dann würde es auch gar nichts anzeigen.

26 B: Also null.

27 S5: Also null, ja.

28 B: Ja. Und welche Geschwindigkeit würde das Messgerät in Raumschiff A anzeigen?

29 S5: Zum ... für diese Person?

30 B: Für diesen Passagier, ja.

31 S5: Ahm, ja dann eben die Geschwindigkeit die das Raumschiff hat weil's ja ... sich im Raumschiff befindet, diese Person.

32

33 B: Ok. Unser Passagier hat sich entschieden aufzustehen und in Richtung Spitze des Raumschiffs zu gehen. Und zwar geht er ganz gemütlich mit 4 km/h. Welche Geschwindigkeit misst jetzt das Messgerät in

34 Raumschiff B für ihn?

35

36 S5: Die 4 km/h die die Person geht.

37 B: Ok. Und welche Geschwindigkeit misst das Messgerät in Raumschiff A?

38 S5: Ja ich würd' sagen um ... 4 km/h mehr da sie ja zusätzlich zu der ... Raumschiffbewegung sich noch

39 bewegt, also...

40 B: Ok. Wir ... lassen jetzt mal unseren Passagier in Ruhe, ersetzen ihn durch eine Lampe.

41 S5: Mhm.

42 B: Die Lampe leuchtet in Richtung Spitze von Raumschiff B. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s.

43 Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät auf Raumschiff B für das Licht?

44 S5: Ja die ... Lichtgeschwindigkeit.

45 B: Ok. Und das Messgerät auf Raumschiff A, was würde das für das Licht messen?

46 S5: Ja wieder ..., also die zwei Geschwindigkeiten ahm addiert, also vom Raumschiff und vom Licht.

47 B: Ok. Jetzt haben wir eine Lampe auf Raumschiff A, die leuchtet in Richtung Heck von Raumschiff A,

48 also in die gleiche Richtung in die sich relativ zu Raumschiff A auch Raumschiff B bewegt.

49 S5: Mhm.

50 B: Wiederum ... Lichtgeschwindigkeit ist bekannt. Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät auf Raumschiff A für dieses Licht?

51

52 S5: Die Lichtgeschwindigkeit.

53 B: Und das Messgerät auf Raumschiff B?

54 S5: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... na die ... Lichtgeschwindigkeit abzüglich der Geschwindigkeit vom Raumschiff.

55

56 B: Ok. Tatsächlich macht man Messungen der Lichtgeschwindigkeit seit über 100 Jahren und ... es ist

57 dabei ganz deutlich geworden, egal wie sich Lichtquelle und Messgerät zueinander bewegen, das Messgerät

58 wird immer exakt Lichtgeschwindigkeit messen. Was sagst du dazu?

59 S5: Hmm ... es klingt irgendwie unlogisch für mich, weil ... wenn ich mich jetzt keine Ahnung sagen wir

60 10 km/h bewege und neben mir bewegt sich jemand mit 20 dann wirkt es ja für mich nicht wie 20, sondern

61 nur wie 10.

62 B: Mhm.

63 S5: Deswegen ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... passt das für mich nicht ganz zusammen.

64 B: Mhm. Nicht intuitiv, gell?

65 S5: Ja.

66 B: Gut. Wir ändern die Situation ein bisschen. Raumschiff A bewegt sich relativ zum Raumschiff B mit
67 100.000 km/s. Auf beiden Raumschiffen gibt's Messgeräte die exakt bestimmen können ob zwei Ereignisse
68 gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Wir haben zwei Fernseher, F1 und F2, auf Raumschiff B, die werden
69 eingeschaltet. Das Messgerät auf Raumschiff B misst, dass beide gleichzeitig eingeschaltet werden. Was
70 misst das Gerät im Raumschiff A?

71 S5: ... hm ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... hm, es wird dasselbe messen, würd ich sagen.

72 B: Ok. Würdest du sagen es gibt überhaupt irgendeine Möglichkeit, dass es etwas anderes misst?

73 S5: ... ahm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... nein.

74 B: Ok. Wieder recht ähnlich, wir haben zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B. Diesmal misst das
75 Messgerät auf Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raum-
76 schiff B?

77 S5: Ja dann, ähm, auch, dass sie gleichzeitig eingeschalt-, also wieder dasselbe.

78 B: Und würdest du sagen, da gibt's irgendeine Möglichkeit, dass es was anderes anzeigt?

79 S5: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... nein, eigentlich nicht.

80 B: Ok. Tatsächlich hat man in Messungen – wenn auch nicht mit Raumschiffen – herausgefunden, wenn
81 zwei Ereignisse auf Raumschiff B gleichzeitig stattfinden, ... wird in einem relativ dazu bewegten Raum-
82 schiff A gemessen, dass sie sicher nicht gleichzeitig stattfinden. Und umgekehrt würde das gleiche gelten.
83 Was sagst du dazu?

84 S5: Hmm ... (17 Sekunden Pause; Anm.) ... also ich mein ich könnt's mir zwar vorstellen, dass es stimmt
85 ...

86 B: Mhm.

87 S5: ... aber ... wär jetzt nicht das woran ich denken würde, also, dass es unterschiedlich is.

88 B: Mhm. So Erklärung wär' noch ausständig.

89 S5: Ja.

90 B: Ok. Gut. Wiederum bewegt sich Raumschiff B relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s. Jetzt haben
91 wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Längen ganz exakt bestimmen können und auf Raumschiff
92 B gibt's eine Bowlingbahn. Welche Länge misst das Messgerät ... tschuldigung (lacht), das Messgerät
93 auf Raumschiff B misst eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Welche Länge würde das Gerät auf
94 Raumschiff A messen?

95 S5: ... ähm ... dieselbe, ... also ... wie viel waren's? 18 Komma ...

96 B: 18,3, ja.

97 S5: ... 18,3, ja.

98 B: Ja, ok. Auf Raumschiff A gibt's auch eine Bowlingbahn und das Messgerät auf Raumschiff A zeigt an,
99 eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Welchen Wert misst das Gerät auf Raumschiff B?

100 S5: ... ähm, wieder denselben.

101 B: Ok.

102 S5: Also auch 18,3.

103 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass das Messgerät das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt im-
104 mer eine kürzere Länge anzeigt. Was sagst du dazu?

105 S5: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... klingt, ähm, unlogisch und nicht einleuchtend für mich,
106 weil ... sich ja die Bowlingbahn, vor allem, wenn jetzt das stillstehende Raumschiff quasi, darauf sich die
107 Bowlingbahn ... befindet nicht einfach die Länge ändert. Beim Bewegen kann ich, könnte man's vielleicht
108 noch verstehen, weil durch ...

109 B: Mhm.

110 S5: ... Bewegen, dass da irgendwas verfälscht wird dadurch, oder sowas in die Richtung ...

111 B: Mhm, ok.

112 S5: ... aber wenn das stillsteht, dann ...

113 B: Aber wir können ja sagen, wenn sich Raumschiff B relativ zu Raumschiff A bewegt, könnten wir uns
114 genauso ins Raumschiff B setzen und von dort aus sehen wir nur, dass Raumschiff A sich wegbewegt, wie

115 wir am Anfang diskutiert haben. So könnten wir's ja theoretisch auch so betrachten.
 116 S5: Ja, stimmt.
 117 B: Und wenn jetzt die beiden Messgeräte, wie's auch in der Realität passieren verschiedene Werte anzeigen
 118 für diese Länge, gibt's da jetzt einen richtigen und einen falschen Wert, oder haben beide Recht?
 119 S5: Mmmh ... also ich mein das is, is dann wahrscheinlich so, dass man's nicht sagen kann welcher richtig,
 120 oder welcher falsch is.
 121 B: Mhm. Und würdest du aber sagen, dass es prinzipiell einen richtigen gäbe?
 122 S5: Ähm ja.
 123 B: Und welcher wäre das deiner Meinung nach?
 124 S5: Also ich würd sagen der ... der Wert von dem wo sich die Bowlingbahn befindet, also vom selben
 125 Raumschiff.
 126 B: Ok. Und zu guter Letzt haben wir auch auf der Erde eine Bowlingbahn und auch hier ein Messgerät das
 127 Längen exakt bestimmt. Ein Raumschiff bewegt sich an der Erde mit 100.000 km/s Relativgeschwindigkeit
 128 vorbei. Das Messgerät auf der Erde misst wiederum eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Welche
 129 Länge misst das Gerät auf Raumschiff, auf dem Raumschiff? Ah, hat keinen Namen mehr.
 130 S5: Ähm ... ja ich würd wieder sagen dieselbe, also ... ähnliche Situation wie vorhin eigentlich.
 131 B: Ok. Tatsächlich ergibt sich auch hier wiederum, dass es (Messgerät auf dem Raumschiff; Anm.) jeden-
 132 falls eine kürzere Länge messen wird, wenn es sich ... relativ zur Bowlingbahn bewegt. Was sagst du dazu?
 133 S5: ... (5 Sekunde Pause; Anm.) ... hmm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich mein im Endeffekt wieder,
 134 ich könnt's mir vorstellen, dass so is ... auf jeden Fall, aber es wär halt nicht ... das Erste woran ich, also
 135 das ... wie ich es sehen würde.
 136 B: Ok. Und wür-, äh, wenn du jetzt zwei verschiedene Messwerte da hast, würdest du sagen, dass' da jetzt
 137 einen richtigen und einen falschen gibt?
 138 S5: ... ähm ... ich mein rein logisch würd ich sagen ja ...
 139 B: Ok.
 140 S5: ... weil, ähm, ... das Messgerät wo sich, also auf der Erde, wo sich ja die Bowlingbahn auch befindet,
 141 ... wär ja rein logisch gesehen müsste ja die, den genaueren Wert, oder den richtigen Wert mehr, oder
 142 weniger haben.
 143 B: Ok. ... Ja, also, sozusagen der wäre auch der richtige Wert.
 144 S5: Mhm.
 145 B: Ok.

Interview 6:

1 B: Als erstes ... schauen wir uns zwei Raumschiffe A und B an. Du befindest dich jetzt mal auf Raumschiff
 2 A und du siehst nichts außer dem Raumschiff B. Keine Sterne, keine Planeten, nichts.
 3 S6: Mhm.
 4 B: Du siehst aber, dass ... du dich relativ zum Raumschiff B bewegst, ... oder auch umgekehrt.
 5 S6: Mhm.
 6 B: Hast du irgendeine Möglichkeit festzustellen, ... ob du dich bewegst, Raumschiff B sich bewegt, oder
 7 ob sich sogar beide bewegen?
 8 S6: ... man sieht nur das Raumschiff, sonst also ...
 9 B: Sonst nichts.
 10 S6: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) mmh, ich mein irgendwann muss das Raumschiff weg sein und dann
 11 sieht man was. Aber so ich glaub, währenddessen könnt ich mir jetzt nichts vorstellen, dass man eine
 12 Möglichkeit hat.
 13 B: Ok. Tatsächlich is es so, dass bei solchen Situationen das nicht gesagt werden kann ... und ... man
 14 deshalb nur von der Relativgeschwindigkeit spricht. Das heißt einer bewegt sich und der andere steht still,
 15 weil es is ja egal, wir können einfach nicht feststellen wer sich bewegt.
 16 S6: Mhm.
 17 B: Ja, das heißt wenn wir von der Relativgeschwindigkeit des einen zum anderen reden könnten sich auch
 18 beide bewegen. Ja, gut. Wir bleiben bei diesen Raumschiffen. Das Raumschiff B bewegt sich jetzt relativ

19 zum Raumschiff A mit 100.000 km/s. Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte die Geschwindigkeiten
20 exakt messen können, und zwar natürlich immer die Geschwindigkeit von sich selbst relativ zu dem was sie
21 messen, ja. Und auf Raumschiff B, oder innen drin natürlich sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit
22 wird das Messgerät im Raumschiff B für den sitzenden Passagier messen?
23 S6: Also das ... die sind beide im Raumschiff?
24 B: Genau.
25 S6: Dann ist logischerweise keine Bewegung, weil das ist ja, gerade ...
26 B: Ok. Und welche Geschwindigkeit würde das Messgerät im Raumschiff A für diesen Passagier messen?
27 S6: Eben diese ... 100.000 km/s.
28 B: Ja, ok. Der Passagier hat sich entschieden aufzustehen und ... offenbar eine Beschwerde beim Captain
29 einzulegen, weil er nach vorne geht, und er bewegt sich da ganz gemütlich mit 4 km/h in Richtung Spitze
30 (von Raumschiff B; Anm.). Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät in Raumschiff B für diesen Pas-
31 sagier?
32 S6: 4 km/h.
33 B: Ok. Und das in Raumschiff A? Was misst das für den Passagier?
34 S6: Also es bewegt sich gegeneinander, das heißt die 4 km/h plus die ... 100.000 km/s.
35 B: Ok. Sogar die Einheiten richtig. (lacht)
36 S6: (lacht)
37 B: Gut. Lassen wir den Passagier mal in Ruhe und betrachten stattdessen eine Lampe im Raumschiff B.
38 Die leuchtet in Richtung Spitze von Raumschiff A. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche
39 Geschwindigkeit misst das Gerät im Raumschiff B für das Licht?
40 S6: Diese ... 300.000 km/s.
41 B: Und das Gerät in Raumschiff A? Was würde das für's Licht messen?
42 S6: Äh, ähm (lacht) ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... wieder beides hätt' ich gesagt, also wieder zusam-
43 mengerechnet, die 1.000 und die 3.000.
44 B: Ok. Wir haben jetzt auch auf Raumschiff A eine Lampe, die leuchtet in Richtung Heck, also in die
45 gleiche Richtung, in die sich auch Raumschiff B relativ zu A bewegt. Welche Geschwindigkeit misst das
46 Gerät auf Raumschiff A für das Licht?
47 S6: Äh, wieder die 300.000 km/s.
48 B: Ja, und das Gerät auf Raumschiff B?
49 S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... das müsst es sein die 300.000 minus den 100.000(?)
50 B: Ok. Tatsächlich hat man Messungen der Lichtgeschwindigkeit schon seit über 100 Jahren gemacht und
51 ... das Ergebnis ist ganz eindeutig, egal wie sich ... Lichtquelle und Messgerät relativ zueinander bewegen
52 das Messgerät misst immer diese 300.000 km/s. Was sagst du dazu?
53 S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja ... (lacht) das ist vielleicht weil sich das Licht halt mit der Ge-
54 schwindigkeit ausbreitet und ich glaub es gibt ja nichts Schnelleres(?) Oder das dann ... dass man nicht
55 mehr messen kann. (lacht)
56 B: Ok. Also du meinst das man's nicht mehr messen kann vielleicht?
57 S6: Ja ...
58 B: Ok.
59 S6: (lacht)
60 B: Und wenn ich dir sag, dass es tatsächlich so ist, dass die Messgeräte auch richtig messen und sie messen
61 halt immer diese 300.000 km/s?
62 S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... weiß nicht vielleicht ... die
63 messen ja auch durch das Licht sozusagen, also man kann Licht, man kann hier so nichts messen, weil's ja
64 irgendwie ... weil das Licht ist, also kann man nicht ...
65 B: Ok. Es ist jedenfalls am Anfang irgendwie ... komisch, oder?
66 S6: Ja. (lacht)
67 B: Schon, ja. Gut. So, wiederum Relativgeschwindigkeit 100.000 km/s. Wie gesagt ist ja egal wer sich
68 wohin bewegt.
69 S6: Mhm.

70 B: Jetzt gibt's auf beiden ... Raumschiffen Messgeräte die exakt bestimmen können ob zwei Ereignisse
71 gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Auf Raumschiff B sind zwei Fernseher, F1 und F2, die werden einge-
72 schaltet.

73 S6: Mhm.

74 B: Und das Messgerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das
75 Messgerät auf Raumschiff A?

76 S6: Auch das gleiche, das es gleichzeitig is.

77 B: Ok. Würdest du sagen, dass es überhaupt eine Möglichkeit gibt, wenn es (das Gerät auf Raumschiff A;
78 Anm.) exakt misst, ... dass es was anderes ... misst als gleichzeitig?

79 S6: Wenn die beiden (Messgeräte; Anm.) sozusagen gekoppelt sind und das sagt gleichzeitig, dann das ...
80 das ja auch.

81 B: Sie sind ja nicht gekoppelt, jedes misst selbst das nach, ob sie gleichzeitig sind, oder nicht. Das misst
82 gleichzeitig, was misst dann das andere?

83 S6: Doch ich glaub schon auch gleichzeitig.

84 B: Ok und du würdest sagen es gibt da eigentlich wenn's richtig misst keine Möglichkeit, dass es anders
85 wär.

86 S6: Ja(?) (lacht)

87 B: Ok. Und ... jetzt haben wir noch zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B und diesmal misst das
88 Gerät auf Raumschiff A, dass die gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff
89 B?

90 S6: Ich hätte auch wieder gesagt gleichzeitig.

91 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben ... -wenn auch ... nicht wirklich mit Raumschiffen, aber die
92 haben wir halt nicht – wenn zwei Ereignisse auf Raumschiff B gleichzeitig stattfinden ... dann stellt man
93 sicher fest, bei einer Messung, dass auf dem relativ dazu bewegten Raumschiff A diese Ereignisse nicht
94 gleichzeitig stattfinden. Was sagst du dazu?

95 S6: (lacht) Das versteh ich nicht warum. (lacht)

96 B: (lacht) Ja. Ok.

97 S6: (lacht)

98 B: Wird so akzeptiert. (lacht)

99 S6: (lacht)

100 B: Gut. Äh, jetzt betrachten wir noch einmal Relativgeschwindigkeit 100.000 km/s und ... auf jedem
101 Raumschiff diesmal ein Messgerät das Längen ganz exakt bestimmt.

102 S6: Mhm.

103 B: Auf Raumschiff B befindet sich eine Bowlingbahn. Das Messgerät auf Raumschiff B misst eine Länge
104 von 18,3 m für die Bowlingbahn. Was misst das Messgerät auf Raumschiff A?

105 S6: (lacht) Ich hätte wieder gesagt auch 18,3.

106 B: Ok. Auch auf Raumschiff A befindet sich eine Bowlingbahn und ... hier misst jetzt das Messgerät auf
107 Raumschiff A dafür eine Länge von 18,3 m. Welche Länge misst das Gerät auf Raumschiff B?

108 S6: Auch wieder das Gleiche?

109 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass das Messgerät, das sich relativ zur Bahn bewegt immer eine
110 kürzere Länge misst. Was sagst du dazu?

111 S6: ... ja ich mein man müsste halt herausfinden, wie es misst, weil an sich wenn's ... in einem Raumschiff
112 is wird das schwer sein durch das Raumschiff durchzumessen. (lacht)

113 B: Wir ... haben als Theoretiker den Vorteil wir sagen das is ein ideales Messgerät, das kann das. Das
114 misst exakt. Und trotzdem ... wird's was Kürzeres messen.

115 S6: Ja, vielleicht, weil's halt den Anfang misst, dann vergeht die Zeit wo's ... vorbei geht und dann misst's
116 das Ende und dann is es ja insgesamt kürzer, weil sich's ja selber bewegt hat.

117 B: Mhm. Ok, ok. Und wenn wir sagen die Messung funktioniert, indem es mal alle Daten sammelt, wie du
118 das grade beschrieben hast und nachher auswertet und da eben berücksichtigt, dass es sich bewegt hat ...
119 und trotzdem misst es was Kürzeres.

120 S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... ja, keine Ahnung. (lacht)

121 B: Ok. Wir haben jedenfalls zwei verschiedene Messwerte. Würdest du sagen da gibt's jetzt einen richtigen
 122 und einen falschen?
 123 S6: ... ich hätte schon eher gesagt, dass es wahrscheinlicher ist, dass das ... wo die Bahn drinnen ist, dass
 124 do-, wo dort gemessen wurde, dass das richtig ist.
 125 B: Ok.
 126 S6: Weil es ja ... dort.
 127 B: Ok. Schließlich haben wir, glücklicherweise, auch auf der Erde eine Bowlingbahn und auch hier wieder
 128 ein Messgerät das Längen exakt bestimmt. Ein Raumschiff bewegt sich wieder mit 100.000 km/s Relativ-
 129 geschwindigkeit an der Erde vorbei. Das Messgerät auf der Erde misst für die Bowlingbahn eine Länge von
 130 18,3 m. Was misst das Gerät auf dem Raumschiff?
 131 S6: Eine andere Länge anscheinend.(?) (lacht)
 132 B: Und was für eine würdest du sagen? (lacht)
 133 S6: (lacht) ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich hätte gesagt länger ...
 134 B: Mhm. Und was wär so generell dein Bauchgefühl dazu?
 135 S6: ... ja also ... so ohne die vorherigen Aufgaben hätt' ich gesagt, dass es ... gleich lang ist, aber ...
 136 wenn die anderen Aufgaben halt das auch ist, halt dann dass es eine andere Länge ist, dann wird's da auch
 137 eine andere Länge sein.
 138 B: Ok. In der Realität ergeben solche Messungen, dass ... wiederum, weil sich dieses Messgerät relativ zur
 139 Bowlingbahn bewegt, es eine kürzere Länge misst. Was sagst du dazu?
 140 S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, also ... ich hätt' das ja
 141 wieder halt gedacht wegen dem Anfang und dem ... Endpunkt, da sich das dann bewegt, dass dann ...
 142 vielleicht kürzer ist deswegen, weil's halt ... woanders ist.
 143 B: Ok. Also ... eigentlich ein Messfehler quasi, weil das nicht berücksichtigt wird.
 144 S6: ... Äh, ja. (lacht)
 145 B: Und würdest du ... sagen da gibt's jetzt einen richtigen und einen falschen Wert?
 146 S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, wenn ich's vorher gesagt hab muss ich's jetzt auch sagen, also.
 147 (lacht)
 148 B: Du musst da gar nichts, das ist ... dir freigestellt was du sagst in diesem Interview.
 149 S6: (lacht) ... ja dann sag ich wieder, dass der Wert (des Messgeräts auf der Erde; Anm.) richtig ist.
 150 B: Ok, danke sehr.
 151 S6: Gerne.
 152 B: Das war's schon wieder.

Interview 7:

1 B: Gut. Als erstes schauen wir uns zwei Raumschiffe, A und B, an ... und du befindest dich im Raumschiff
 2 A. Man sieht sonst nichts, keine Sterne, keine Planeten, gar nichts, schwarzer Hintergrund. Das Einzige
 3 was du siehst ist, dass Raumschiff B sich relativ zu dir bewegt.
 4 S7: Mhm.
 5 B: Kannst du irgendwie feststellen, ob du dich bewegst, Raumschiff B sich bewegt, oder sich sogar beide
 6 bewegen?
 7 S7: ... mmh ... ja, wenn ich gar nix sehe, ... dann nicht.
 8 B: Ja, genauso ist es, in solchen Situationen spricht deshalb nur von der Relativgeschwindigkeit. Wenn
 9 man dann sagt ein Objekt bewegt sich relativ zum anderen mit einer Geschwindigkeit, könnte es genauso
 10 gut sein, dass das stillsteht und das andere sich bewegt.
 11 S7: Mhm, das ist wie im Zug beim Bahnhof.
 12 B: Ganz genau, wenn man abfährt und ...
 13 S7: Weil da schaut man dann noch einmal raus auf die, ob die Bäume sich jetzt bewegen, oder ob der ...
 14 Zug ...
 15 B: Ganz genau, ja. ... Deshalb ... jetzt zwei Raumschiffe. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff
 16 A mit 100.000 km/s.
 17 S7: Mhm.

18 B: Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte, die die Geschwindigkeit von Objekten exakt messen
19 können. Dabei messen sie immer die Geschwindigkeit eines Objekts relativ zu sich selbst.
20 S7: Mhm.
21 B: Wir haben einen sitzenden Passagier in Raumschiff B. Welche Geschwindigkeit für den sitzenden Pas-
22 sagier misst das Messgerät in Raumschiff B?
23 S7: ... ja ist das (Messgerät; Anm.) ... drinnen, oder draußen?
24 B: Das ist da drin im Raumschiff ...
25 S7: Drinnen, so wie's abge-, ok. Ähm ... ja dann wahrscheinlich von ... Raumschiff B.(?)
26 B: Wie meinst du?
27 S7: Ja, ... wenn das ... Messgerät im Raumschiff B ist, dann ...
28 B: Welche Geschwindigkeit misst's dann für den Passagier in Raumschiff B ... der da sitzt?
29 S7: Der Passagier ... bewegt sich ja gar nicht, aber das Raumschiff bewegt sich. Kommt halt drauf an wie
30 das ...
31 B: Ok, aber das Gerät misst tatsächlich nur wie sich der Passagier relativ zu dem Messgerät selbst bewegt.
32 S7: Ah, also gar nicht.
33 B: Also null, ja und was würde das Gerät im Raumschiff A messen für diesen Passagier ... im Raumschiff
34 B?
35 S7: Wie schnell sich die ... Rakete, oder das Raumschiff B bewegt.(?)
36 B: Unser Passagier hat sich entschieden, dass er ...
37 S7: Aufsteht.
38 B: ... aus irgendeinem Grund zur Spitze des Raumschiffs (B; Anm.) gehen will, recht gemütlich mit 4
39 km/h.
40 S7: Mhm.
41 B: Welche Geschwindigkeit, für den Passagier, misst das Gerät im Raumschiff B?
42 S7: 4 km/h.(?)
43 B: Und welche misst das Gerät im Raumschiff A?
44 S7: Die ... Geschwindigkeit vom Raumschiff B, also diese 1300 irgendwas.(?)
45 B: Und die 4 km/h die der da noch in die gleiche Richtung geht, machen die einen Unterschied, oder nicht?
46 S7: Nein.
47 B: Überhaupt nicht?
48 S7: Ja für ... das Messgerät A nicht.
49 B: Ja es misst ja nicht wie schnell das Raumschiff B ist, sondern es misst wirklich wie schnell der da (der
50 Passagier; Anm.) ist.
51 S7: Aso, ja dann ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... hmm, wahrscheinlich schon.(?)
52 B: Was glaubst du, wie würde sich das auswirken?
53 S7: ... ähm, er ist wahrscheinlich ... für Messgerät A schneller ... als für Messgerät B, aber langsamer als
54 die Rakete B.(?)
55 B: Na er berücksichtigt ja die Rakete mit. Er misst ja quasi beides auf einmal, weil er ... Hast du schon
56 mal erlebt, dass der Zug an dir vorbeifährt, so langsam und jemand geht im Zug auch noch in die gleiche
57 Richtung wie der Zug. Ist der dann von dir aus gesehen schneller als der Zug, oder langsamer als der Zug?
58 ... Du stehst am Bahnsteig, Zug fährt vorbei und da geht noch jemand in Richtung Zug.
59 S7: Ja wahrscheinlich schneller. Aber ... schneller.
60 B: Da geht der noch irgendwie schneller aus deinem Blickfeld.
61 S7: Ja stimmt.
62 B: Und was würde dann ... das hier (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) für den gehenden Passagier
63 messen?
64 S7: Dass er schneller geht.
65 B: Um wie viel ... würde er quasi schneller sein als nur das Raumschiff? ... (4 Sekunden Pause; Anm.)
66 ... wenn er 4 km/h geht.
67 S7: Die 4 km/h.
68 B: Ja genau. Gut, lassen wir unseren Passagier in Ruhe ...

69 S7: Die Lichtgeschwindigkeit.
70 B: Stellen wir eine Lampe hin (auf Raumschiff B; Anm.). Die leuchtet in Richtung der Spitze von Raumschiff
71 B. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät im Raumschiff
72 B für das Licht?
73 S7: Diese ... Lichtgeschwindigkeit, die drei Komma ... irgendwas.
74 B: Ja, du brauchst den Zahlenwert nicht unbedingt. Und ... das Gerät im Raumschiff A, was wird das für
75 das Licht messen?
76 S7: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja wieder das sch-, ... also wieder schneller(?.)
77 B: Mhm.
78 S7: Und ... wahrscheinlich wieder ... um die ... um diesen Zahlenwert mehr.
79 B: Mhm, ok. Und ... schließlich haben wir noch eine Lampe im Raumschiff A die leuchtet in Richtung
80 Heck, also in die gleiche Richtung in die sich, relativ zum Raumschiff A, das Raumschiff B auch bewegt.
81 Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät im Raumschiff A für das Licht?
82 S7: Lichtgeschwindigkeit.
83 B: Und das im Raumschiff B?
84 S7: Die ... das Gleiche wie beim andern(?.)
85 B: Mhm.
86 S7: Nur ... in die andere Richtung.
87 B: Und ... würde das heißen es ... würde das Licht schneller, oder langsamer wahrnehmen als jetzt nur
88 Lichtgeschwindigkeit? Weil es ... bewegt sich in die gleiche Richtung wie das Licht.
89 S7: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja irgendwann einmal sieht man das ja nicht mehr deswegen, weil's
90 hinter einem ist.
91 B: Mmh, hast du schon erlebt, auf der Autobahn vielleicht im Urlaub fahren, oder sowas, dass man ...
92 halt brav die 130 fährt und daneben fährt einer mit 150. Wie schnell schaut denn der für dich aus?
93 S7: Schneller? Wer jetzt? Der ... in die gleiche Richtung fährt(?.)
94 B: Der der an dir vorbeifährt, in die gleiche Richtung, schaut der für dich jetzt aus als würde der 150
95 fahren, oder ... oder irgendwie anders? Weil, du fährst ja selber mit 130 in die gleiche Richtung.
96 S7: Ja er fährt auf jeden Fall schneller als ich, also das sieht man schon, aber jetzt nicht ... man kann
97 jetzt nicht sagen der fährt 20 km/h schneller. Also ... halt schon viel schneller, aber ...
98 B: Wie nimmst du ihn quasi wahr, wenn du jetzt ... die Autobahn rundherum vernachlässigst und der
99 fährt da an dir vorbei? Zischt der wirklich dann aus deiner Sicht mit 150 an dir vorbei, oder ... irgendwie
100 anders?
101 S7: Ja.
102 B: Schon?
103 S7: Ja, eigentlich schon.
104 B: Also das ist ... äh, dann hier würdest du sagen, was misst das Messgerät für das Licht? Die bewegen
105 sich in die gleiche Richtung, also quasi auf der Autobahn das vorher.
106 S7: Wie ... lang man das Licht sieht?
107 B: Na einfach nur, welche Geschwindigkeit misst das (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) für das Licht.
108 Licht bewegt sich dahin, Raumschiff bewegt sich dahin.
109 S7: Ja die Geschwindigkeit des Lichts.
110 B: Ok.
111 S7: Also wieder diese ... wie bei dem vorher.
112 B: Gut. Und ... jetzt muss ich dir sagen ... man macht seit ...
113 S7: Das ist falsch ...
114 B: Nein, man macht seit über 100 Jahren für Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Situationen. Und es hat
115 sich gezeigt, bei allen Messungen ... egal wie sich Lichtquelle und Messgerät relativ zueinander bewegen,
116 das Messgerät misst immer exakt die Lichtgeschwindigkeit, ohne Veränderung. Was sagst du dazu?
117 S7: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ja das überrascht mich jetzt nicht, eigentlich.
118 B: Wieso nicht?
119 S7: Ja weil ... Licht sich geradlinig ausbreitet ...

120 B: Ok.
 121 S7: Ja, Welle-Teilchen-Dualismus egal, aber ...
 122 B: (lacht)
 123 S7: ... ähm ... du kannst ja jetzt nicht Licht ... langsamer abstrahlen, ... oder langsamer messen als,
 124 als es ist, weil Licht bleibt immer gleich.
 125 B: Ok. Gut. Wir betrachten, wiederum zwei Raumschiffe, Relativgeschwindigkeit 100.000 km/s, wie ge-
 126 wohnt. Wir haben jetzt zwei Messgeräte, auf jedem Raumschiff eines die jeweils exakt messen können, ob
 127 zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht.
 128 S7: Mhm.
 129 B: Es gibt auf Raumschiff B zwei Fernseher, F1 und F2.
 130 S7: Mhm.
 131 B: Die werden eingeschaltet. Das Messgerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet
 132 werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff A?
 133 S7: ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, wahrscheinlich misst das das auch, dass es gleichzeitig pas-
 134 siert.
 135 B: Ok. Würdest du sagen es gibt ... überhaupt irgendeine Möglichkeit, dass es was anderes misst?
 136 S7: ... Frequenzen, so Störungen und so ... könnten schon passieren, aber ... (3 Sekunden Pause; Anm.)
 137 ... ich lass das jetzt mal außer Acht und sage sie gehen gleichzeitig.
 138 B: Ok, also ... wie nehmen an da gibt's keine Messfehler.
 139 S7: Ja.
 140 B: Genau, ok. Gut. Wir haben noch zwei Fernseher, F3 und F4.
 141 S7: Mhm.
 142 B: Diesmal misst das Gerät im Raumschiff A, dass die gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das
 143 Gerät im Raumschiff B?
 144 S7: Dass sie gleichzeitig eingeschalten werden, also dass es gleichzeitig passiert.
 145 B: Ok. In der Realität haben wir natürlich keine Raumschiffe.
 146 S7: Ja.
 147 B: Trotzdem kann man Messungen machen, die dem entsprechen und bei denen ergibt sich ... wenn zwei
 148 Ereignisse im Raumschiff B gleichzeitig stattfinden, ... dann finden sie im relativ dazu bewegten Raum-
 149 schiff A sicher nicht gleichzeitig statt und umgekehrt. Was sagst du dazu?
 150 S7: ... (13 Sekunden Pause; Anm.) ... Ist das jetzt eine wahre Aussage, oder is ... ?
 151 B: Ja. Ich erzähle dir keinen Blödsinn, keine Sorge.
 152 S7: Ja, nein, es könnte auch eine ... Fangfrage sein.
 153 B: Nanananana.
 154 S7: Ah ... ja ... gut, wenn's ein Fernseher ist ... ähm ... ist ja kein Licht, oder geht's darum wie sich
 155 dieses Fernsehlicht ausbreitet, oder wie man den Fernseher einschaltet?
 156 B: Also so ... die Laufzeit vom Licht selbst die wird berücksichtigt vom Messgerät, also das hat's mitein-
 157 berechnet und trotzdem ist ganz klar die Aussage, ähm, dass wenn's hier gleichzeitig ist, ist es da nicht
 158 gleichzeitig und umgekehrt.
 159 S7: Ja, ok. Also jetzt meinen's mal kein Licht, also vielleicht, also ... der den Fernseher einschaltet ist,
 160 also das, was den Fernseher einschaltet ist kein Licht, ist ja Strom.
 161 B: Naja, Strom, ähm, bewegt sich an sich auch mit Lichtgeschwindigkeit.
 162 S7: Ok, ... wusste ich nicht, egal.
 163 B: Immerhin jetzt. (lacht)
 164 S7: Ähm ... ja keine Ahnung ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... wird schon seinen Grund haben. Aber es
 165 ...
 166 B: Aber es, ... du findest es jetzt nicht intuitiv, oder? Sofort nachvollziehbar ...
 167 S7: Nein.
 168 B: Mhm. Wieder die gleiche Ausgangssituation, Relativgeschwindigkeit 100.000 km/s. Auf beiden Raum-
 169 schiffen haben wir jetzt Messgeräte die exakt Längen bestimmen können. Auf Raumschiff B gibt es eine
 170 Bowlingbahn.

171 S7: Mhm.
 172 B: Das Messgerät auf Raumschiff B misst für die Länge der Bowlingbahn 18,3 m.
 173 S7: Mhm.
 174 B: Was misst das Gerät im Raumschiff A?
 175 S7: Auch 18,3 m(??)
 176 B: Ok. Auch auf Raumschiff A haben wir eine Bowlingbahn. Jetzt misst das Gerät auf Raumschiff A eine
 177 Länge von 18,3 m für diese Bowlingbahn. Was misst dann das Gerät auf Raumschiff B?
 178 S7: Auch 18,3 m(??)
 179 B: Ok. In der Realität ergeben die Messungen ...
 180 S7: Wahrscheinlich nicht.
 181 B: (lacht) ... ah tatsächlich, dass das Messgerät, das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt immer eine
 182 kürzere Länge misst. Was sagst du dazu?
 183 S7: Ah ok das macht schon Sinn, weil, es bewegt sich ja ... so und dann ... wird das so zusammengescho-
 184 ben jetzt quasi ... und es ergibt schon Sinn, dass es ... wenn das vorbeigeht, dass das was dann gemessen
 185 wird quasi so ... der Anfangspunkt wird gemessen dann bewegt sich's und dann wird der Endpunkt kürzer
 186 gemessen als, ... als das wirklich ist.
 187 B: Ok, ok. Und wenn das Messgerät jetzt, äh, das so messen würde und ... diese Daten einfach mal
 188 sammelt und dann berücksichtigt, dass es diesen Effekt gibt, dann würde es trotzdem noch eine kürzere
 189 Länge messen. Was sagst du dazu?
 190 S7: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) Ja da muss die Geschwindigkeit auch mitein-, einberechnet werden?
 191 B: Ist berücksichtigt.
 192 S7: ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... Keine Ahnung.
 193 B: Ok. Wenn wir jetzt da zwei verschiedene Messwerte haben – den 18,3 und hier (bei dem relativ zur
 194 Bahn bewegten Messgerät; Anm.) einen kürzeren – würdest du sagen da gibt's jetzt einen richtigen und
 195 einen falschen Wert? ... Oder sind beide richtig?
 196 S7: Absolut gesehen wahrscheinlich gibt's einen falschen Wert, der von Rakete B, aber relativ gesehen dann
 197 wahrscheinlich nicht.
 198 B: Ok, was meinst du mit „relativ gesehen“?
 199 S7: Naja, weil, der von B ist ja nicht falsch, der misst ja trotzdem eine Länge.
 200 B: Ok.
 201 S7: Aber ... es ist nicht exakt die Länge die wirklich ... vorhanden ist.
 202 B: Ok. Jetzt noch ... betrachten wir zum Abschluss eine Bowlingbahn auf der Erde und auch hier wieder
 203 ein Messgerät, das die Länge exakt misst.
 204 S7: Mhm.
 205 B: Und ein Raumschiff bewegt sich relativ zur Erde mit 100.000 km/s vorbei. Das Messgerät auf der Erde
 206 misst 18,3 m für die Länge (der Bowlingbahn; Anm.). Was misst das Gerät auf dem Raumschiff?
 207 S7: Eine kürzere ... also nicht ... 18,3, sondern irgendwas darunter.
 208 B: ... Und warum?
 209 S7: Weil wir das davor schon gesagt haben?
 210 B: Ok.
 211 S7: Und ... weil ... die Distanz zwischen der Rakete und der Erde ja so hoch ist, dass ... sich eine
 212 Krümmung ergibt(??)
 213 B: Ja, aber bei den 18,3 m macht das tatsächlich keinen Unt-, da ist das egal. (lacht)
 214 S7: (lacht)
 215 B: Da, da spüren wir keine Krümmung.
 216 S7: Ah, ok.
 217 B: Ok. Und ... von dei-, aber von deinem Bauchgefühl her jetzt, wenn man die vorige Frage außer Acht
 218 lässt, was würdest du da sagen?
 219 S7: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Jetzt hätte ich gesagt das ist wieder gleich lang, aber ...
 220 B: Ok, ja ... und jetzt auch hier wieder sage ich dir es gibt zwei verschiedene Messwerte. Würdest du da
 221 sagen es gibt einen richtigen, einen falschen, oder beide richtig?

222 S7: Ich würde wieder sagen, dass beide richtig sind, nur der ... auf der Erde ist halt der exakte Wert.
 223 B: Ok.
 224 S7: ... Weil, es gibt sicher irgendwelche Faktoren die bei der Rakete da jetzt, ... oder bei dem Raumschiff
 225 mitspielen ... die das Ergebnis dann trotzdem richtig ... sein lassen.
 226 B: Mhm ... ok. Danke sehr, das war's schon wieder.

Interview 8:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe, A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A und man sieht außer
 2 dem Raumschiff B nichts anderes, also ... keine Sterne im Hintergrund keine Planeten, schwarzer Hinter-
 3 grund. Das was du aber siehst ist, dass ... Raumschiff B sich relativ zu ... Raumschiff A bewegt. Hast
 4 du irgendeine Möglichkeit festzustellen, ob sich Raumschiff A bewegt, Raumschiff B bewegt, oder sogar
 5 beide?
 6 S8: ... Ahm ... das Erste was mir eingefallen ist ist Psychologie, aber ich glaube das ist eher weniger was
 7 wir da gerade haben wollen, weil da haben wir das ja besprochen, dass es immer eine Körperempfindung
 8 ist, aber wie ich feststellen kann, dass ... ich kann ja nicht einmal einen anderen Anhaltspunkt finden,
 9 weil es ist alles schwarz ...
 10 B: Mhm, ja.
 11 S8: Hm ... wahrscheinlich kann man's ... nicht feststellen?
 12 B: Tatsächlich nicht, nein und ... deshalb spricht man immer von der sogenannten Relativgeschwindigkeit.
 13 Wenn ich sage Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A, dann heißt das nicht unbedingt, dass das
 14 sich bewegt und das stillsteht, könnte auch umgekehrt sein, oder irgendwas dazwischen ... wir können's
 15 aber nicht feststellen, deshalb ist es egal. Und genau ... so ... fangen wir auch gleich an. Das Raumschiff
 16 B bewegt sich relativ zum Raumschiff A mit 100.000 km/s. Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte
 17 die Geschwindigkeiten exakt messen können. Dabei messen sie natürlich immer die Relativgeschwindigkeit
 18 zwischen sich selbst und dem was sie halt messen. Auf Raumschiff-, also im Raumschiff B sitzt noch ein
 19 Passagier ... ganz gemütlich. Was misst denn das Messgerät im Raumschiff B für diesen Passagier, für die
 20 Geschwindigkeit?
 21 S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Die Geschwindigkeit mit dem sich das ... Flugzeug, die Rakete,
 22 oder so, bewegt(??)
 23 B: Und wenn du ... im Zug sitzt, zum Beispiel und in der Reihe vor dir sitzt noch jemand, was würdest
 24 du sagen wie schnell bewegt sich der im Verhältnis zu dir?
 25 S8: Gleich schnell(??)
 26 B: Und findest du, dass sich der von dir entfernt, wenn du im Zug sitzt?
 27 S8: Hm dieses, das hat ich eigentlich noch nie, dieses Bedürf-, also ... (lacht)
 28 B: Also das wäre auch ungewöhnlich ...
 29 S8: (lacht)
 30 B: ... und genau das ist es ja was wir messen, ja. Also ob sich das ... der Passagier vom Messgerät
 31 wegbewegt, oder zu ihm hinbewegt und wie schnell er das tut. Was würde dann dieses Messgerät (auf
 32 Raumschiff B; Anm.) bestimmen? Also welche Geschwindigkeit für den sitzenden Passagier?
 33 S8: Die Geschwindigkeit wie schnell er sich wegbewegt, ... wenn er sich wegbewegt.
 34 B: Und ... wenn er sitzt? Wie schnell ist das dann?
 35 S8: Null.
 36 B: Null, ja. Und was bestimmt dann ... dieses Messgerät (auf Raumschiff A; Anm.) für die Geschwindig-
 37 keit des Passagiers?
 38 S8: ... 100.000 ... km/s.
 39 B: Ja. ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Der Passagier hat sich entschieden, zur Spitze des Raumschiffs
 40 zu gehen ...
 41 S8: Mhm.
 42 B: ... und geht da mal gemütlich mit 4 km/h in diese Richtung. Welche Geschwindigkeit misst das Mess-
 43 gerät auf dem Raumschiff (B; Anm.) für ihn?
 44 S8: 4 km/h.

45 B: Und das Messgerät ... im Raumschiff A?
 46 S8: ... Für ihn (den Passagier; Anm.)?
 47 B: Für ihn. Für diesen Passagier der sich bewegt.
 48 S8: 100.000 und 4 km/h pro Sekunde. (lacht)
 49 B: Ist nur die Einheiten ... aber darum geht's nicht. (lacht)
 50 S8: Ach so. (lacht) Ups.
 51 B: Das ist vollkommen egal jetzt. (lacht) Gut, wir ... lassen unseren Passagier in Ruhe und stellen statt-
 52 dessen eine Lampe auf. Die Lampe leuchtet in Richtung der Spitze von Raumschiff B, auf dem sie sich
 53 auch befindet. Welche, ah, Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst
 54 das Messgerät auf Raumschiff B für das Licht?
 55 S8: 300.000 km/s.
 56 B: Und das Messgerät auf Raumschiff A, was würde das messen für's Licht?
 57 S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... ja ...
 58 B: Wie hast du's denn beim Passagier gelöst?
 59 S8: Vorher habe ich ja dazugerechnet, dann habe ich mir gedacht vielleicht ist es ja trotzdem gleichblei-
 60 bend, also, dass es immer noch nur die Geschwindigkeit vom Flugzeug ist, deswegen wanke ich gerade, ob
 61 es nicht immer noch nur 100.000 ist, weil ... es bewegt sich ja vorwärts ... mit 100.000 und das Licht
 62 bewegt sich ja ... mit und nicht zusätzlich.
 63 B: Wenn du dir das vorstellst, dass ein ... dass du am Bahnsteig stehst und da fährt so der Zug langsam
 64 vorbei und jemand geht noch dazu in die gleiche Richtung wie der Zug. Verschwindet der schneller aus
 65 deinem Blickfeld, oder langsamer als irgendein Sitzplatz der sich nicht bewegt. Der fährt so vorbei und da
 66 geht noch einer.
 67 S8: Ja, er verschwindet schneller ... wenn der sich bewegt.
 68 B: Was würdest du dann sagen für die ...
 69 S8: Naja, dann wird's wahrscheinlich ... 400.000 sein.
 70 B: Ok. Also bleibst du wieder dabei ... wie bei dem Passagier vorher.
 71 S8: Ich bleibe dabei. (lacht)
 72 B: Ja ... gut. Wir haben auch eine Lampe im Raumschiff A, die leuchtet in Richtung Heck, also in die
 73 gleiche Richtung in die sich relativ zum Raumschiff A auch Raumschiff B bewegt.
 74 S8: Mhm.
 75 B: Welche Geschwindigkeit ... misst ... das Messgerät im Raumschiff A für das Licht?
 76 S8: ... 300.000 km/s.
 77 B: Und das in Raumschiff B?
 78 S8: Für's Licht immer noch?
 79 B: Für's Licht, ja, für's Licht.
 80 S8: 300.000 km/s ... obwohl ... es (Raumschiff B; Anm.) geht ja hundert ...
 81 B: Ja ... die bewegen sich in die gleiche Richtung, das Licht und das Raumschiff.
 82 S8: Na dann wird sich's eigentlich auch hundert ... oh nein! (lacht)
 83 B: Nicht so tragisch. (lacht)
 84 S8: Denkprobleme. (lacht)
 85 B: Kein Problem.
 86 S8: Ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ...
 87 B: Wenn man's (das Raumschiff B; Anm.) anschaut, bewegt sich dahin mit 100.000 und das Licht dahin
 88 mit 300.000. Welche Geschwindigkeit misst ... das mitbewegte, äh, mit dem Raumschiff (B; Anm.) mit-
 89 bewegte Messgerät für das Licht?
 90 S8: Ich glaub ich da, auch 300.000, weil sich's (das Messgerät; Anm.) ja mitbewegt.
 91 B: Na es (das Messgerät; Anm.) bewegt sich ja nicht mit dem Licht mit, sondern mit dem Raumschiff (B;
 92 Anm.) und das ...
 93 S8: Ach so.
 94 B: ... ist jetzt die Frage.
 95 S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaube ... ich glaube ich

96 bleibe bei 300.000(?) (lacht)

97 B: Ok. Tatsächlich misst man die Lichtgeschwindigkeit in ... verschiedenen Situationen schon seit über

98 100 Jahren.

99 S8: Mhm.

100 B: Und ... die Experimente sagen ganz eindeutig, egal wie sich die Lichtquelle ... und das Messgerät

101 relativ zueinander bewegen, das Messgerät wird immer diese 300.000 km/s messen.

102 S8: Oh.

103 B: Was sagst du dazu?

104 S8: ... Ja ... ist ok für mich. (lacht)

105 B: Ist ok für dich, ok. (lacht) Aber findest du jetzt nicht irgendwie ... ungewöhnlich, oder seltsam?

106 S8: Ich meine, in verschiedenen Situationen ...

107 B: Ist ja egal ob's ...

108 S8: Ich mein ich habe ja auch begonnen zu addieren, ... plötzlich. Also es wäre irgendwie als würde man

109 davon ausgehen, dass es ... schneller wird, wenn man sich selbst auch mitbewegt.

110 B: Ja.

111 S8: Und, dass es nicht so ist, ist erstaunlich, aber ... nehme ich halt jetzt mal so hin. (lacht)

112 B: Ja, das ist dein gutes Recht. (lacht) Ok. Wir bleiben bei diesen Raumschiffen, Relativgeschwindigkeit

113 ... jetzt woanders eingezeichnet, aber immer noch 100.000 km/s. Jetzt haben wir Messgeräte die exakt

114 messen können ob ... zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Auf Raumschiff B befinden sich

115 zwei Fernseher, F1 und F2, die werden eingeschaltet. Das Messgerät im Raumschiff B misst, dass sie gleich-

116 zeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät im Raumschiff A?

117 S8: ... Nochmal zur Wiederholung, sie messen, die Messgeräte messen, ob etwas gleichzeitig stattfindet(??)

118 B: Ja.

119 S8: Beide immer dasselbe(?)

120 B: In dem Fall halt ... messen sie jetzt das gleiche Ereignis ... die gleichen Ereignisse quasi.

121 S8: Ja dann wird das ... Messgerät in Raumschiff A auch messen, ob ... die gleichzeitig eingeschaltet

122 worden sind, oder nicht.

123 B: Ja, und ... wird es messen, dass sie gleichzeitig eingeschaltet worden sind, oder nicht, wenn das hier

124 (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) sagt die sind gleichzeitig eingeschaltet worden?

125 S8: Dann wird das das andere Messgerät (auf Raumschiff A; Anm.) auch sagen.

126 B: Ok. Und würdest du sagen es gibt überhaupt irgendeine Möglichkeit, dass das dann was anderes anzeigt

127 und sagt die waren nicht gleichzeitig?

128 S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... nein.

129 B: Ok. Ähnlich ... wir haben noch zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B und diesmal misst das

130 Gerät auf Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was sagt dann das Gerät auf Raum-

131 schiff B?

132 S8: ... Immer noch dasselbe.

133 B: Und auch hier würdest du wieder sagen ...

134 S8: Es ... sie haben sich gleichzeitig eingeschaltet und ...

135 B: Ok. Tatsächliche Messungen – nicht mit Raumschiffen, haben wir nicht – aber die dazu vergleichbar

136 sind haben ergeben ... wenn zwei Ereignisse im Raumschiff B gleichzeitig stattfinden, ... finden sie im

137 relativ dazu bewegten Raumschiff A sicher nicht gleichzeitig statt.

138 S8: Wow. (lacht)

139 B: Was sagst du dazu?

140 S8: Ähm ... weiß ich jetzt nicht. (lacht) Ich mein man könnt's vielleicht, es, liegt's an der Geschwindigkeit?

141 Also hier (bei Raumschiff A; Anm.) ... es fehlt ja einfach nur der Pfeil es bewegt sich ja immer noch so,

142 oder?

143 B: Ja genau. Wie auch immer. Kann sein, dass der sich bewegt, oder der, oder beides, ... egal.

144 S8: ... Ja ... ist mir jetzt nicht ganz so ersichtlich, weil wenn es ist, dass beide ... es messen, ob etwas

145 gleichzeitig stattfindet, oder nicht, dann muss eines von beiden ja eigentlich fehlerhaft sein wenn's gleich-

146 zeitig stattfindet, aber das andere das nicht ... feststellen kann.

147 B: Ok. Wir bleiben bei der gleichen Ausgangslage, Relativgeschwindigkeit 100.000 km/s. Wir haben jetzt
148 Messgeräte, auf beiden Raumschiffen, die Längen exakt bestimmen können.

149 S8: Mhm.

150 B: Und auf Raumschiff B befindet sich eine Bowlingbahn. Das Messgerät auf Raumschiff B misst für diese
151 Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Was misst das Gerät auf Raumschiff A? ... (4 Sekunden Pause;
152 Anm.) ... Was für eine Länge?

153 S8: Ja ... ich würde sagen ... 18,3m?

154 B: Also das Gleiche, oder?

155 S8: Dasselbe.

156 B: Ok. ... Wir haben auch eine Bowlingbahn auf Raumschiff A und ... auch hier ein Messgerät, dass
157 ... wiederum hier sagt, diese Bowlingbahn hat eine Länge von 18,3 m. Was misst dann das Gerät auf
158 Raumschiff B?

159 S8: (lacht) 18,3 m. (lacht)

160 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass das Messgerät das sich relativ zur Bahn bewegt, immer eine
161 kürzere Länge misst. Was sagst du dazu?

162 S8: ... Ähm, ok erst mal und wahrsch-, vielleicht, dass es zusammenhängt mit ... eben, wenn sich jetzt
163 ... B bewegt und ... A die Bahn hat, dass es sich deswegen vielleicht verkürzt ...

164 B: Ok.

165 S8: ... und das Messgerät deswegen eine andere Länge misst.

166 B: Mhm. Und was, was führt jetzt genau dazu, dass das das andere misst?

167 S8: Die ... Bewegung einer Rakete.

168 B: Ok und wie wirkt sich die aus?

169 S8: Eben das, vielleicht irgendwie dadurch, dass es ... ein stillstehendes ... Objekt, also wenn man davon
170 ausgeht, dass ... Raumschiff A ... sich nicht bewegt ... und B relativ dazu ... weg, oder halt in die
171 andere Richtung und das so schnell ist, also halt 100.000 ... irgendwas (lacht) ähm ... dass es ... sich
172 ... irgendwie nicht hinterher kommt, oder aufgrund der Geschwindigkeit ein ... falsches ... Ergebnis
173 produziert, bzw. die Länge nicht komplett ... erfassen kann.

174 B: Ok, das heißt du würdest, dass dann hier (auf Raumschiff A; Anm.) der richtige Messwert ist und das
175 (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) einen falschen Messwert anzeigt?

176 S8: Würde ich schon sagen, weil das eben ... hier ist eigentlich ..., Entschuldigung, keine ... Fehlerquelle
177 im Sinne vom ... Gerät selbst schon, aber vielleicht nicht von den umständigen ... also um, um ... au-
178 ßenrum Situationen. Wie genau sagt man das?

179 B: Von den Umständen einfach, ...

180 S8: Ok.

181 B: ... oder Bedingungen, was auch immer, ja.

182 S8: Bedingungen.

183 B: Ok. Gut. Zu guter Letzt haben wir noch eine Bowlingbahn auf der Erde und wieder ... Messgeräte die
184 die Länge messen und ein Raumschiff bewegt sich relativ zur Erde mit 100.000 km/s.

185 S8: Mhm.

186 B: Das Messgerät auf der Erde misst eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Was misst das Gerät
187 am Raumschiff? ... Für diese Länge?

188 S8: Mhm ... vorhin war's kürzer(??)

189 B: Ok und was würdest du aus dem Bauch heraus sagen?

190 S8: Länger. (lacht)

191 B: Länger, ok.

192 S8: Das Gegenteil. (lacht)

193 B: Und wenn du das vorher vernachlässigen würdest, was wäre dann dein Gefühl gewesen?

194 S8: Gleich.

195 B: Gleich, ok. Tatsächliche Messungen ergeben auch hier, da sich dieses Gerät (auf dem Raumschiff; Anm.)
196 relativ zur Bahn bewegt, dass es eine kürzere Länge anzeigt. Was sagst du dazu?

197 S8: (lacht) Ist genau das, was ich nicht gedacht habe.

198 B: Ok, ja. (lacht)
 199 S8: Weil, ... ich meine ... von vorher habe ich ja auch gesagt mit der Geschwindigkeit, das könnte jetzt
 200 auch wieder sein.
 201 B: Ok.
 202 S8: Ach ja, und wenn man ... die Erde dreht sich ja auch ... deswegen dachte ich vielleicht ...
 203 B: Aber relativ langsam, ja. (lacht)
 204 S8: Ja, aber vielleicht hilft's auch. (lacht)
 205 B: (lacht) Ok. Und ... würdest du jetzt sagen es ist einer dieser Werte richtig und der andere falsch, oder
 206 beide richtig?
 207 S8: ... Es kann nicht beides richtig sein, weil ... eines von ... ich mein, stimmt es können auch beide
 208 nicht stimmen ... aber ...
 209 B: Inwiefern, ja?
 210 S8: ... naja, wenn sich beide vermessen und man legt ein Maßband daneben und da kommt heraus es ist,
 211 keine Ahnung, 19 m.
 212 B: Ach so, ok.
 213 S8: Ah, ich glaube weiterhin, dass das das ... stillstehende, ... nähere ... Messgerät ... oder ... auch
 214 auf der Erde befindende ... stimmen wird.
 215 B: Das ... ok. Gut. Danke sehr.

Interview 9:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe, A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A und außer dem Raum-
 2 schiff B ist sonst nichts sichtbar, kein Hintergrund, keine Sterne, keine Planeten, schwarzer Hintergrund.
 3 Du siehst aber, dass das Raumschiff B relativ zu ... dir bewegt. Hast du irgendeine Möglichkeit festzu-
 4 stellen, ob sich Raumschiff A bewegt, Raumschiff B bewegt, oder, ob sich sogar beide bewegen?
 5 S9: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Also ich glaube auf jeden Fall, dass sich eines von beiden bewegen
 6 muss ...
 7 B: Mindestens. (lacht)
 8 S9: ... ähm ... ich habe keinen Bezugspunkt, also kann ich nicht feststellen ob ich mich bewege, oder ob
 9 Raumschiff B sich bewegt ... ahm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ich kann auch keinen Bezugspunkt
 10 herstellen, oder aufbauen ... ja ich, also ich ich habe keine Ahnung ... welches Raumschiff sich bewegt,
 11 ich kann nur feststellen, dass eines sich bewegt, oder beide sich bewegen, beides ist möglich.
 12 B: Ok. Tatsächlich, so ist es und deshalb spricht man in solchen Situationen immer von der Relativgeschwin-
 13 digkeit, wenn man dann sagt Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A, mit einer bestimmten
 14 Geschwindigkeit, dann sagt man damit nicht, dass Raumschiff A stillsteht und das (Raumschiff B; Anm.)
 15 sich bewegt, sondern nur ... irgendwas bewegt sich jedenfalls. Ok. Jetzt betrachten wir, dass Raumschiff
 16 B sich, relativ zum Raumschiff A, mit 100.000 km/s bewegt. Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte,
 17 die Geschwindigkeiten exakt messen können, dabei messen sie immer die Relativgeschwindigkeit zwischen
 18 sich selbst und dem was sie messen. Also, bewegt sich das auf mich zu, oder von mir weg, das misst das und
 19 wie schnell. Im Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät im Raumschiff
 20 B für diesen Passagier, der dort sitzt?
 21 S9: Die Geschwindigkeit relativ zum Raumschiff A, also ...
 22 B: Na, es misst die Geschwindigkeit von sich selbst, relativ zum ...
 23 S9: Ach so!
 24 B: ... Passagier.
 25 S9: Ach so, wie sich das von mir ..., ach so, ja dann ... null, weil der Passagier bewegt sich für das Ding
 26 ja nicht, weil sie beide ... in der gleichen ... Einheit praktisch sind, die sich schnell bewegt.
 27 B: Mhm. Und ... das Messgerät in Raumschiff A, was wird das für diesen sitzenden Passagier messen?
 28 S9: Also ... sofern es ihn sieht wird es die Geschwindigkeit von ... Raumschiff ... B messen, aber man
 29 muss dabei ... bedenken, dass Raumschiff A sich ja auch bewegt, das heißt, wenn ... Raumschiff A sich in
 30 die Gegenrichtung bewegt, dann wird die Bewegung automatisch schneller werden, das heißt es wird eine
 31 schnellere Bewegung für B messen.

32 B: Und genau das meinen wir mit der Relativgeschwindigkeit. Die fasst quasi beide Bewegungen auf jeden
33 Fall zusammen.

34 S9: Ja, voll.

35 B: Das heißt wenn die (Relativgeschwindigkeit; Anm.) 100.000 km/s ist ...

36 S9: Und die (Geschwindigkeit von Raumschiff A; Anm.) 100.000, dann haben wir 200.000 km/s.

37 B: Ah, wir sagen schon, das ist schon die Relativgeschwindigkeit ...

38 S9: Ach so!

39 B: ... die ist schon zusammengefasst 100.000, was misst denn dann das Gerät (auf Raumschiff A; Anm.)
40 für den Passagier?

41 S9: Das Gerät für den Passagier, das hat 100.000, das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) ist ruhig, oder
42 bewegt sich auch?

43 B: Ja, wie gesagt, das ist zusammengefasst, wir wissen nur ... das Raumschiff (A; Anm.) bewegt sich
44 relativ zu dem Gerät jedenfalls mal mit 100.000 ...

45 S9: Dann misst's genau diese Geschwindigkeit von 100.000, ja.

46 B: Ok. Gut, unser Passagier hat sich entschieden nach vorne, zur Spitze des Raumschiffs zu gehen, gemütlich
47 mit 4 km/h. Welche Geschwindigkeit misst ... (das Messgerät auf Raumschiff B?; Anm.)

48 S9: 4 km/h.

49 B: Ok und welche misst der (das Gerät; Anm.) in Raumschiff A?

50 S9: Der misst jetzt hun-, also, äh, die Relativgeschwindigkeit plus die 4 km/h, oder s- ..., das das misst
51 den ... den Menschen, oder?

52 B: Ja.

53 S9: Dann mischt's, äh, misst's beides zusammen, also 4 km/h plus die Relativgeschwindigkeit.

54 B: Ok. Und ... jetzt lassen wir den armen Passagier in Ruhe und stellen stattdessen eine Lampe (auf
55 Raumschiff B; Anm.) auf. Die Lampe leuchtet in Richtung der Spitze von Raumschiff B. Welche Ge-
56 schwindigkeit ... misst das ... Messgerät in Raumschiff B für das Licht?

57 S9: Für das Licht ... einfach nur die Lichtgeschwindigkeit von ... da nach da.

58 B: Genau, Lichtgeschwindigkeit, ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät in Raum-
59 schiff A für das Licht?

60 S9: Äh, Lichtgeschwindigkeit plus Relativgeschwindigkeit.

61 B: Ok.

62 S9: Oder ...

63 B: Oder ...?

64 S9: Äh, Licht ist ja ... an sich ein Teilchen ...

65 B: Ja mit ... mit Welle und Teilchen hat das alles tatsächlich überhaupt nichts zu tun.

66 S9: ... Ok, dann, ja dann würde ich's genau so lassen. Es, es misst beides zusammen praktisch ... wie
67 beim Passagier.

68 B: Ok.

69 S9: ... Wobei sich Licht wahrscheinlich irgendwie anders verhält.

70 B: (lacht) Was du ... woraus schließt?

71 S9: Ähm, ... weil Licht immer komisch ist, ähm ... das haben wir jetzt gelernt im letzten halben Jahr.
72 (lacht)

73 B: Das kann ich mir vorstellen. Äh ... jetzt haben wir eine Lampe in Raumschiff A und das Licht ...
74 die Leuchtet in Richtung Heck, also in die gleiche Richtung ... in die sich auch Raumschiff B relativ zu
75 Raumschiff A bewegt. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät im Raumschiff A für das Licht?

76 S9: ... Wieder die ganz normale Lichtgeschwindigkeit.

77 B: Und das Raumschiff B?

78 S9: Das misst jetzt die Lichtgeschwindigkeit minus der Relativbewegung, weil ... na warten sie. ... Licht
79 bewegt sich nach rechts, das (Raumschiff B; Anm.) bewegt sich auch nach rechts ... ja doch, weil das
80 Messgerät sich mitbewegt, wird die Geschwindigkeit geringer, ja.

81 B: Kennen wir ja von der Autobahn, da fährt einer mit 150 vorbei, ein frecher und für mich schaut er aus,
82 als würde er 20 vorbeifahren.

83 S9: Voll.

84 B: Ok. Tatsächlich misst man die ... Lichtgeschwindigkeit in verschiedensten Situationen schon seit über
85 100 Jahren. Und dabei hat sich herausgestellt, wie du schon ... vermutet hast, Licht ist komisch, dass egal
86 wie sich ... Lichtquelle und Messgerät relativ zueinander bewegen, das Messgerät immer 300.000 km/s
87 misst.

88 S9: Ok ...

89 B: Was sagst du dazu?

90 S9: Ist komisch ... äh ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... das Licht bewegt sich immer gleich schnell, egal
91 ... wie schnell wir uns bewegen ... Ich mein ... mit wie viel hat man's gemessen, hat man das gemessen
92 mit äh ... ich mein wir können keine 100.000 Kilome-, äh m/s fliegen, das schaffen wir nicht.

93 B: Verschiedenste Bedingungen. Aber es ergibt sich nicht nur aus ...

94 S9: Also kann es nicht sein, dass in ... irgendwelchen arbiträren Größen, Richtung Unendlichkeit das halt
95 erst auswirkt?

96 B: Kann gar nicht sein, nein. Ähm ... unter bestimmten Bedingungen konnte man ... natürlich nicht mit
97 Raumschiffen, aber auch tatsächlich große Geschwindigkeiten messen und wie sich die dann ... verhalten,
98 das ging schon, ja.

99 S9: Hm, hmhm, dass die Lichtgeschwindigkeit immer gleich ist ... auch wenn ich relativ dazu bewege ...
100 (4 Sekunden Pause; Anm.) ...

101 B Auf jeden Fall ist es mal seltsam, oder?

102 S9: Es ist definitiv seltsam und macht keinen Sinn, ähm ... ich überlege jetzt ... (8 Sekunden Pause;
103 Anm.) ... keine Ahnung, da bräuchte ich Zeit zum drüber nachdenken.

104 B: Ok. Gut. Wir betrachten wieder die beiden Raumschiffe mit Relativgeschwindigkeit, diesmal woanders
105 (bei Raumschiff A; Anm.) eingezeichnet, 100.000 km/s. Diesmal befinden sich auf beiden (Raumschiffen;
106 Anm.) Messgeräte die exakt bestimmen ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Auf Raum-
107 schiff B gibt's zwei Fernseher, F1 und F2, die werden eingeschaltet. Das Gerät auf Raumschiff B misst,
108 dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff A?

109 S9: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... (unverständlich, flüstern) ... hat das, ... gibt's einen Toleranzbe-
110 reich von wegen äh ... je weiter der Fernseher weg ist, desto ...

111 B: Wird miteinberechnet.

112 S9: Wird miteinberechnet.

113 B: Die Messung wird ... über einen Zeitraum hinweg gemacht und die Daten dann ausgewertet.

114 S9: Ok, dann misst, äh ... das Gerät A auch ... genau, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.

115 B: Ok, würdest du sagen, dass es überhaupt eine Möglichkeit gibt, irgendeine, dass es was anderes messen
116 könnte als gleichzeitig?

117 S9: Also, wenn zum Beispiel diese Toleran-, äh dieser Toleranzbereich nicht wäre, dann ... wird's logi-
118 scherweise so, ... sind jetzt ganz ganz minimale Größen, aber weil der Weg hier (zu F1; Anm.) kürzer als
119 der Weg hier (zu F2; Anm.) und somit wird's ... das da ... äh, als zuerst eingeschaltet empfinden, weil
120 das kann nicht ... gleichzeitig ... äh beides messen, solange's nicht genau in der Mitte, oder genau gleich
121 entfernt ist, aber ...

122 B: Und in Summe hätten wir quasi einen Messfehler?

123 S9: Genau! Einen kleinen Messfehler.

124 B: Ok. Gut, wir haben noch zwei Fernseher, F3 und F4 auf Raumschiff B, diesmal misst das Gerät auf
125 Raumschiff A, dass die gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff B?

126 S9: Ahm, dementsprechend ... wie haben wieder diesen Messfehler, der aber berücksichtigt wurde, das
127 heißt das Gerät auf Raumschiff B misst genau das auf Raumschiff A.

128 B: OK. Tatsächliche Messungen zu ... ähnlichen Situationen natürlich, nicht mit Raumschiffen in der
129 Realität, haben ergeben ... wenn zwei Ereign-, für zwei Ereignisse auf Raumschiff B gleichzeitig gemessen
130 werden, ... dann werden sie auf dem relativ dazu bewegten Raumschiff A sicher nicht gleichzeitig gemes-
131 sen. Was sagst du dazu?

132 S9: ... Ja, das könnte Sinn er ... geben, vor allem weil eben ... Bewegung im Spiel ist ... und die
133 Bewegung das Messergebnis auf jeden Fall verzerren kann.

134 B: Ok.

135 S9: Ähm, also erst mal glaube ich es wird ungenauer dadurch, weil ... man hat ja trotzdem ein Fenster
 136 in dem man, ähm ... das Signal empfangen muss. Und in dem Fenster kann sich das Raumschiff halt
 137 trotzdem bewegen und ... und ... zeigt natürlich zeigt's, ähm ... einfach irgend-, also zeigt's an, dass F3
 138 schneller ist, oder F4 schneller ist, oder irgendwas, eines von beiden, oder ... also, ist eine Frage, F3, oder
 139 F4, ähm, welches von beiden ist schneller eingeschaltet für dieses Gerät?

140 B: ... Ist ... irrelevant.

141 S9: Ja, ok. Ja, also ich glaube es liegt, äh, an der Bewegung und ... würde durchaus Sinn machen.

142 B: Also du würdest sagen auch de facto wieder ein Messfehler, an sich.

143 S9: Ja! Ein Messfehler.

144 B: Mhm, ok. Jetzt kommen wie an sich schon zur Letzten Grundsituation, wieder ... das Gleiche mit
 145 der Relativgeschwindigkeit 100.000 km/s. Auf beiden Raumschiffen sind diesmal Geräte die Längen exakt
 146 bestimmen und auf Raumschiff B gibt es eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B misst für die
 147 Länge der Bowlingbahn 18,3 m. Welchen Wert misst das Gerät auf Raumschiff A?

148 S9: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... der (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) misst 18,3 m ... ähm ... (5
 149 Sekunden Pause; Anm.) ... also Strecken verändern sich ja nicht bei Bewegung, eine Strecke bleibt gleich,
 150 weil die Strecke ist definiert. Jedoch ... ahm ... hmhm ... ich könnte mir wieder vorstellen, dass ein
 151 Messfehler vorhanden ist, weil, ahm, ... ich, ich brauche eine gewisse Zeit, ich muss ja den ersten Punkt
 152 sehen und wenn ich, keine Ahnung, mit so einem Laserstrahl messe, zum Beispiel, braucht das ja, bis es
 153 reflektiert wird und dann kann ich sehen, wie weit es entfernt ist und wenn ich mich währenddessen, äh,
 154 sich das Objekt dabei bewegt ... dann ... variiert das Ganze auch so. Also wenn wir genau jetzt in dem
 155 Moment berech-, äh ... messen ... ist das so ... ist das, ist das egal, kann er sich hier stellen, hier stellen,
 156 hier stellen, hier stellen?

157 B: Ja.

158 S9: Ok. ... Dann, äh ... glaube ich, dass wieder ein Messfehler auftreten wird ... ein minima-, also je
 159 nachdem wie schnell halt das Messgerät ist.

160 B: Ja.

161 S9: Und ... ja, dass es vielleicht einen minimal anderen Wert ... angibt, also ...

162 B: Ok. Und wenn wir sagen, dass das wieder vom Messgerät berücksichtigt wird, es Daten sammelt und
 163 am Ende auswertet? Was würdest du dann sagen?

164 S9: ... Dann würde ich sagen eine Strecke kann sich nicht verändern, also ... diese Strecke bleibt immer
 165 18,3 m lang und wenn das Messgerät richtig misst, dann muss es 18,3 m messen.

166 B: Ok. Sehr ähnlich, diesmal haben wir auf dem Raumschiff A eine Bowlingbahn. Das Messgerät auf
 167 Raumschiff A misst für dieses eine ... für diese eine Länge von 18,3 m. Welche Länge misst jetzt das auf
 168 Raumschiff B?

169 S9: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Der einzige Unterschied ist jetzt, dass Raumschiff B sich, relativ
 170 bewegt.

171 B: Mhm.

172 S9: Ähm ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich würde sagen, Raumschiff ... das auf Raumschiff B wird
 173 tendenziell eine kürzere Distanz messen ...

174 B: Mhm ...

175 S9: ... aber wobei nein, wenn's vorbeibewegt ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... also wieder ein kleiner
 176 Messfehler(??)

177 B: Mhm und wenn wir wieder sagen sie messen perfekt?

178 S9: ... Dann ist die Distanz ... ich meine nur grafisch, wenn sich's jetzt so verschiebt wär's logisch, wenn
 179 sie kürzer wäre, ... aber wir haben ja gesagt das Messgerät kann irgendwo stehen, demnach ...

180 B: Ja und es berücksichtigt solche Sachen auch, ja.

181 S9: Genau, deshalb ... würde es wieder 18,3 m messen.

182 B: Ok. Und ... wenn ich dir jetzt sage man hat auch solche Messungen in der Realität durchgeführt und
 183 wieder ... exakte Messgeräte, also Messfehler ... spielen jetzt keine Rolle, dann ist ganz sicher, dass das
 184 Messgerät, das sich relativ zur Bahn bewegt, einen kürzeren Wert messen wird. Was sagst du dazu?

185 S9: ... Also rein intuitiv ergibt's Sinn für mich.
186 B: Ja.
187 S9: Kann auch sein, dass es nur an der Zeichnung liegt, weil das, äh Messgerät sich praktisch weiter rüber
188 bewegen würde und ich so, ... mir das so vorstelle, dass es so ... mit so einem Strahl gemessen wird.
189 B: Ok.
190 S9: Ähm ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... Jetzt ich kann's nicht erklären, aber rein intuitiv macht's schon
191 Sinn.
192 B: Ok. Und wenn wir sagen es liegt eben tatsächlich nicht daran wie gemessen wird, sondern einfach an
193 sich, es würde jedenfalls so sein, egal wie gemessen wird.
194 S9: Also ... einfach irgendein Objekt bewegt sich ...
195 B: Und ein Messgerät relativ dazu und ich würde eine kürzere Länge messen.
196 S9: Als das Messgerät, das ... auf dem ... davor ist praktisch.
197 B: Das ... dabei ist, ja.
198 S9: ... Die bewegen sich ... (21 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... also ich hänge bei dem, ich hänge
199 bei der ... bei der Tatsache, dass eine Strecke für mich ja immer gleichbleibt, ähm ... und deshalb ... ist
200 derweil das einzig Logische für mich, dass es ein Messfehler sein muss, weil ... eine Strecke, die Strecke,
201 die gemessen wird, verändert sich ja de-, demnach nicht, oder?
202 B: Und ... du willst also sagen es gibt einen richtigen und einen falschen Messwert, wenn die beiden
203 verschiedene Werte anzeigen?
204 S9: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Also rein nach dieser Logik, ja.
205 B: Und welcher wäre dann der richtige?
206 S9: Der richtige wäre der der von dem, äh ... Messgerät, dass an Bord ist.
207 B: Ok. Und zu guter Letzt haben wir auch ... auf der guten alten Erde eine Bowlingbahn und auch hier
208 wieder ein Messgerät, dass die Länge exakt bestimmt und ein Raumschiff das sich, relativ dazu, mit 100.000
209 km/s bewegt. Das Messgerät auf der Erde misst für die Länge der Bowlingbahn 18, 3 m. Was misst dann
210 das Gerät auf dem Raumschiff? ... Bei exakter Messung.
211 S9: Also wir haben festgestellt ... wir haben jetzt wieder, wir haben jetzt festgestellt vorhin schon, ... dass
212 das Raum-, äh, das Messgerät was Kürzeres messen muss anscheinend, weil das ... ja bewiesen wurde,
213 ähm ...
214 B: Ok und was wäre aber dein, dein Bauchgefühl?
215 S9: Mein Bauchgefühl wäre dabei ... Bowlingbahn auf der Erde, das Messgerät ... (7 Sekunden Pause;
216 Anm.) ... also irgendwie macht's Sinn, dass die Bewegung das ... das Messereignis, oder die, die Länge,
217 die gemessen wird beeinflusst ... aber ich, ich kann's hier nicht rationalisieren, weil wenn's, falls ich's
218 rationalisiere komme ich wieder zurück zu meinem ... Strecke bleibt gleich und ... alles andere macht
219 keinen Sinn.
220 B: Ok. Und ... die zeigen jetzt verschiedene Werte an, würdest du sagen da gibt's einen richtigen und
221 einen falschen?
222 S9: Definitiv, der Wert auf der rich-, also wenn ... wenn's ein richtig und falsch gibt, dann auf jeden Fall
223 der auf der Wer-, Erde ist richtig, ... ähm, weil, als richtig sehen wir ja nur das an was für uns relevant
224 ist und was für uns relevant ist ist auf der Erde und nicht im Raumschiff ...
225 B: Ja, da könnte die Crew vom Raumschiff anderer Meinung sein. (lacht)
226 S9: Ja eh, aber da-, also, ... wir geh-, also ... der, das Messgerät, äh, vom Raumschiff ist ja kalibriert auf
227 die Einstellungen, die wir auf der Erde hatten, demnach gehen wir, die Einstellungen von der Erde sind
228 praktisch unser Grundwert. Deshalb muss, wenn's ein richtiges gibt, das untere das richtige sein.
229 B: Ok. Vielen Dank.

Interview 10:

1 B: Zunächst betrachten wir zwei Raumschiffe, A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A. Du siehst,
2 außer dem Raumschiff B, nichts anderes, keine Sterne, keine Planeten. Aber du siehst, auf jeden Fall gibt's
3 Bewegung zwischen Raumschiff A und Raumschiff B. Kannst du irgendwie feststellen, ob du dich bewegst,
4 oder ob sich Raumschiff B bewegt, oder ob sich sogar beide bewegen?

5 S10: Ähm, ich glaube durch Lichter, die ... zum Beispiel Raumschiff A, oder Raumschiff B entsenden,
6 wenn ich hier zum Beispiel Raumschiff B beleuchte und ... sehe, dass diese ... wenn ich zum Beispiel
7 Punkte, oder so hinleuchte und die sich dann ... dann nach paar Sekunden, oder Minuten irgendwo anders
8 befinden, dann könnte ich vielleicht, ähm, vor allem feststellen, dass sie ... sich bewegen.
9 B: Aber könntest du feststellen wer sich bewegt?

10 S10: Ähm, ich glaube das würde ... schon, ... das wäre schon schwer, weil ... es im Weltall komplett
11 dunkel ist und wenn sowieso keine Sterne, oder irgendwas ist, dann ... wär's glaube ich fast unmöglich.
12 B: Mhm. Tatsächlich ist es ... vollkommen unmöglich und deshalb spricht man ... bei solchen Situationen
13 nicht davon wer sich jetzt bewegt, sondern nur von einer Relativbewegung. Man spricht dann auch von der
14 Relativgeschwindigkeit, wenn man aber sagt ... das Raumschiff B bewegt sich relativ zum Raumschiff A,
15 dann heißt das noch nicht, dass sich unbedingt B bewegt, könnte sich genauso gut A bewegen.

16 S10: Mhm.

17 B: Wir bleiben bei diesen beiden Raumschiffen. Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raumschiff A, mit
18 100.000 km/s. Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte die Geschwindigkeiten exakt messen können.
19 Dabei messen sie immer wie sich ... das Objekt, das sie messen relativ zu ihnen selbst bewegt.

20 S10: Mhm.

21 B: Auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit wird das Messgerät auf Raumschiff B ...
22 für den sitzenden Passagier messen?

23 S10: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Wahrscheinlich ... gar nicht, weil es mit B bewegt, oder, äh, sich
24 mit B bewegt und ... nicht relativ zu A, ... sondern es ist in B begriffen quasi ... und dann ... ändert
25 es seine Geschwindig-, Geschwindigkeit, also Position gar nicht, weil es in B ist, ... finde ich.

26 B: Mhm. Und ... welche Geschwindigkeit wird das ... Messgerät im Raumschiff für diesen Passagier mes-
27 sen?

28 S10: Genauso wie B, also 100.000 km/s, waren das, glaube ich.

29 B: Mhm. Der Passagier entscheidet sich ... in Richtung der Spitze von Raumschiff B zu gehen, gemütlich
30 mit 4 km/h. Welche Geschwindigkeit misst jetzt das Messgerät im Raumschiff B für ihn?

31 S10: ... Ahm ... wahrscheinlich 4 Kilom-, km/h, weil ... es relativ zu dieser ... Position, ähm ... ge-
32 messen wird ... und A würde dann ... noch immer B, ah, glaube ich, messen, weil es nicht ... nur auf
33 Personen fokussiert werden kann.

34 B: Aha, das Messgerät ist tatsächlich so gut im Raumschiff A ...

35 S10: Ach so, ok.

36 B: dass es auch ... das mitberücksichtigt. Was würde das dann messen für diese Person insgesamt?

37 S10: Ich glaube dann, diese 100.000 und noch diese 4 ... Kilometer noch dazu, ... also km/h.

38 B: Mhm. Der Passagier wird jetzt durch eine Lampe ersetzt, die leuchtet in Richtung der Spitze von Raum-
39 schiff B. Licht bewegt sich mit ... ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät
40 auf Raumschiff B für das Licht?

41 S10: Ich glaube, ahm ... da es in B bleibt und ... nicht ... herauskommt, quasi, ähm ... es ist gleichblei-
42 bend und ähm ... es ist, quasi nicht Lichtgeschwindigkeit, sondern, konstant, würde ich sagen(?) Also es
43 kann nicht als Lichtgeschwindigkeit gemessen werden(?) Oder nur diese Lichtgeschwindigkeit einfach und
44 B's Geschwindigkeit ist dabei ... ist nicht dabei.

45 B: Ok ... und ... das Messgerät in Raumschiff A, was würde das für das Licht messen?

46 S10: ... Wahrscheinlich dann auch so wie vorher, das Licht und B gleichs-, also ... zusammengerechnet
47 werden(?).

48 B: Mhm. Jetzt schauen wir uns eine Lampe auf Raumschiff A an, die leuchtet in Richtung Heck von
49 Raumschiff A, also in die gleiche Richtung in die sich auch Raumschiff B, relativ zu Raumschiff A, bewegt.
50 Welche Geschwindigkeit misst das gerät auf Raumschiff A für das Licht?

51 S10: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Also ich glaube, ahm ... die Richtungen sind ... egal ... ähm ...
52 deswegen ... würde ich das Lichtgeschwindigkeit als, ahm ... also diese Lichtgeschwindigkeit ist das was
53 es ... das was gemessen wird. Ahm, egal in welche Richtung das geht, glaube ich.

54 B: Mhm. Und was würde das Gerät auf Raumschiff B für das Licht messen?

55 S10: ... Ahm, wenn es, wenn die ... in zwei verschiedene Richtungen gehen, also A und B, dann würde

56 ich, ahm, das abziehen, also Licht und ... Geschwindigkeit von A ... relativ zu B.
57 B: Und was würdest du wovon abziehen?
58 S10: ... Ich würde ... ähm, von A Licht abziehen. ... Also wie schnell sich das bewegt und minus ...
59 Lichtgeschwindigkeit.
60 B: Ok. Man macht Messungen der Lichtgeschwindigkeit schon seit ... über 100 Jahren, auch in verschie-
61 denen Situationen ... und das Ergebnis ist ... gewesen, dass egal wie sich Lichtquelle und ... Messgerät
62 relativ zueinander bewegen ... immer exakt die Lichtgeschwindigkeit gemessen wird. Was sagst du dazu?
63 S10: ... Also, ich glaube, das ist schon ... logisch, wenn man nachdenkt, weil ... ähm ... Licht bewegt
64 sich dann ... anscheinend immer gleich ... und ... also gleich schnell und ahm ... dann ist es egal in
65 welche Richtung das geht, oder wo es sich befindet, es verbreitet sich, oder bewegt sich gleich schnell.
66 B: Also würdest du sagen ... das ... überrascht dich persönlich nicht so sehr, dass das Licht sich ...
67 anders verhält als der Passagier den wir vorher betrachtet haben.
68 S10: Hm, nein.
69 B: Ok. Wir betrachten wieder die beiden Raumschiffe ... und Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raum-
70 schiff B mit 100.000 km/s. Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte die exakt messen, ob zwei Ereignisse
71 gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Auf Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2, die eingeschaltet
72 werden. Das Messgerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das
73 Gerät auf Raumschiff A?
74 S10: ... Ähm, dass, ähm ... also diese Geräte messen, dass sie ... gleichzei-, dass, ... was war das nochmal
75 was diese Geräte messen?
76 B: Unabhängig voneinander messen sie jeweils, ob ... diese Fernseher hier gleichzeitig eingeschaltet wer-
77 den, oder nicht.
78 S10: Ok, dann misst, also dann misst ... das da, also A genauso wenn F1 und F2 eingeschaltet werden,
79 unabhängig von diesem Messgerät (auf Raumschiff B; Anm.)?
80 B: Mhm, ach so, ja. Du würdest sagen, dass es auch misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden?
81 S10: Ja.
82 B: Würdest du sagen es gibt überhaupt irgendeine Möglichkeit, dass es etwas anderes feststellen könnte?
83 S10: ... Ähm, vielleicht wann ... Messgerät B darauf reagiert, äh, oder wie es ... darauf reagiert, dass
84 sie gleichzeitig eingeschaltet werden(?.)
85 B: Wie meinst du das?
86 S10: Also ... A kann ja, ... meiner Meinung nach feststellen, ob F1 und F2 gleichzeitig, ähm ... funktio-
87 nieren, oder eingeschaltet werden und vielleicht auch noch kann es irgendwie, ... äh, feststellen, ob B das
88 auch mitbekommen hat, oder das auch misst, dass die gleichzeitig eingeschaltet werden.
89 B: Das spielt tatsächlich keine Rolle.
90 S10: Ok.
91 B: Wir betrachten noch zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B. Und diesmal stellt das Gerät auf
92 Raumschiff A fest, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Also, äh das Gerät auf Raumschiff A misst,
93 dass die Fernseher F3 und F4 ... gleichzeitig eingeschaltet werden, was wird das Gerät auf Raumschiff B
94 messen ... für diese beiden Fernseher?
95 S10: ... Ähm, auch, ob sie gleichzeitig eingeschaltet werden, oder nicht?
96 B: Ja, das will's feststellen und wird es sagen die sind gleichzeitig eingeschaltet worden, ... oder nicht?
97 S10: ... Ähm, wahrscheinlich schon, weil A das feststellt.
98 B: Und würdest du ... hier sagen, dass es irgendeine Möglichkeit gibt, dass ... es etwas anderes feststellt?
99 S10: Hm ... wenn ... ähm ... wahrscheinlich irgendwas nicht ... genau eingestellt ist, oder wenn diese
100 Geschwindigkeit zwischen A und B auch eine Rolle dabei spielt. Ähm, dass ... zum Beispiel A bisschen
101 später mitbekommt als B, weil B befindet sich ja neben F3 und F4 ... und ... wenn es A ein bisschen
102 verzögert mitbekommt, dann ist es bei B ein bisschen was anderes, aber halt wahrscheinlich ... richtiger(?.)
103 B: Ok. Also du würdest sagen, wenn man das aber mit-, mitberücksichtigt, wenn das Messgerät das auch
104 mitberücksichtigt, dann müssen sie auch das Gleiche messen.
105 S10: Ja.
106 B: Ok. In der Realität hat man auch Messungen zu ... Gleichzeitigkeit gemacht und dabei festgestellt

107 ... wenn zwei Ereignisse auf ... vom Messgerät auf Raumschiff B als gleichzeitig gemessen werden, dann
108 werden sie auf dem relativ dazu bewegten Raumschiff A sicher nicht als gleichzeitig gemessen.
109 S10: Mhm.
110 B: Was sagst du dazu?
111 S10: Ja das ist ... also sicher nicht, hätte ich nicht gedacht, aber schon, also ich habe vorher auch irgend-
112 wie vermutet, dass, ... dass die, dass es irgendwas ... noch, ahm ... dazukommt was diese Messungen
113 verändert zwischen A und B, beziehungsweise, dass sie nicht gleich rauskommen, aber ich hätte nicht ge-
114 sagt, dass es ganz sicher nicht gleich ist.
115 B: Das Ergebnis war nämlich ... wenn die Messungen perfekt sind, auch dann würde es messen, würde es
116 ein ... nicht gleichzeitiges Ergebnis messen.
117 S10: Ok.
118 B: ... Findest du das überraschend, oder ...?
119 S10: Na schon.
120 B: Schon.
121 S10: Schon.
122 B: Ok. Wir betrachten jetzt wieder, dass Raumschiff B sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s
123 bewegt. Auf beiden ... äh, Raumschiffen sind Messgeräte die Längen exakt messen. Und auf Raumschiff
124 B gibt es eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3
125 m. Was misst das Gerät auf Raumschiff A für diese Länge?
126 S10: ... Wenn wir davon ausgehen, ahm ... dass diese ... ahm ... Messgeräte von vorher auch nicht, ahm
127 ... gleich ... oder ähnlich ... messen konnten, dann würde ich hier auch sagen, dass Länge und Zeit, ahm
128 ... schon irgendwie ähnlich sind, ich glaube Länge kann man ein bisschen genauer messen als ... Zeit,
129 bzw. wann irgendwas eingeschalten wird. Deswegen würde ich ... nicht ausschließen, dass sie das gleiche
130 Ergebnis bekommen, aber es könnte schon, dass ... was anderes rauskommt.
131 B: Ok. Und wenn wir davon ausgehen, dass die Messgeräte tatsächlich perfekt messen?
132 S10: Ähm, trotzdem ... genauso, also ich würde nicht ausschließen sie ... dann auch gleich sind, aber
133 auch nicht, dass es nicht stimmt ... was die beiden ... rausbekommen.
134 B: Und wenn es ... nicht stimmt, also wenn sie nicht das Gleiche bekommen, würdest ... woran würde
135 das deiner Meinung nach liegen?
136 S10: Ahm, ich glaube Entfernung und ... Geschwindigkeit(?)
137 B: Ok, also das müsste man mit-, mitberücksichtigen bei der Messung ...
138 S10: Ja.
139 B: Auf Raumschiff A haben wir auch eine Bowlingbahn und das Gerät auf Raumschiff A misst für diese
140 Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Was misst das Gerät auf Raumschiff B für diese Länge?
141 S10: ... Ich glaube umgekehrt, ahm ... geht es genauso und ... ahm ... es ist halt unterschiedlich wo sich
142 die Messgeräte befinden, aber trotzdem ... glaube ich nicht, dass es irgendwas ausmacht ahm ... ich würde
143 noch immer sagen, dass es, ahm ... davon abhängt wie sich diese Raumschiffe bewegen beziehungsweise
144 wie schnell und wie weit voneinander.
145 B: Ok. Tatsächlich ... hat man mittlerweile herausgefunden in der Forschung ... wenn die Messungen
146 perfekt sind, dann wird das Messgerät, das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt immer eine kürzere Länge
147 messen. Wenn die Messung perfekt ist.
148 S10: Mhm.
149 B: Was sagst du dazu?
150 S10: Also ... ich finde es überraschend, dass es, ahm ... kürzer ist dann, also ich hätte schon gesagt, dass
151 es nicht, wahrscheinlich nicht stimmt, oder nicht immer stimmt, aber ... ich find's irgendwie ... komisch,
152 dass es dann immer kürzer herauskommt.
153 B: Ok.
154 S10: ... Ähm, ja.
155 B: Und würdest du sagen ... nachdem die beiden jetzt verschiedene Werte anzeigen, dass es dabei einen
156 richtigen und einen falschen Wert gibt, oder ... dass beide Recht haben?
157 S10: Ich glaube, ähm ... beide können Recht haben, ich glaube nicht, dass irgendwas davon ... nicht

158 stimmt.
 159 B: Mhm. Das heißt wir hätten wir hätten zwei verschiedene Längen für die Bowlingbahn und du würdest
 160 sagen trotzdem stimmen beide Ergebnisse.
 161 S10: Ich glaube schon, weil die nicht ... quasi nebeneinander stehen, also die Messgeräte ...
 162 B: Mhm.
 163 S10: Wenn schon, also ... wenn beide sich auf Raumschiff A befinden würden, ähm ..., oder ... halt an
 164 beiden Enden dieser Bowlingbahn, dann hätte ich schon gesagt, dass sie gleich ... sein sollten, aber sie
 165 befinden sich auf zwei ... verschiedene ... Körper, oder in zwei verschiedenen Raumschiffen und ... die
 166 bewegen sich auch unterschiedlich, also deswegen würde ich sagen ... es kann halt nicht perfekt sein, auch
 167 wenn die Messungen perfekt eingestellt sind.
 168 B: Mhm, also es ist dann trotzdem ... eigentlich ein Fehler?
 169 S10: Ähm ... also ich glaube ... schon, dass es ... ein Fehler ist, aber ich würde nicht sagen, dass es, ähm
 170 ... unbedingt falsch ist.
 171 B: Ok. Und was würdest du sagen wäre dann die tatsächliche Länge der Bowlingbahn? Was dieses Gerät
 172 in A misst, oder was dieses Gerät in B misst?
 173 S10: Wahrschei-, ich, also ich würde ... sagen A stimmt, weil es viel näher ist und kann diese Bowlingbahn
 174 genauer betrachten, unter Führungszeichen, ähm ... und B hat, ähm ... viel ... schlimmere Umstände,
 175 sage ich jetzt mal so, oder nicht genauer ... ähm, Angaben und ja.
 176 B: Ok. Wir haben noch auf der Erde eine Bowlingbahn und auch hier ein Messgerät das Längen exakt
 177 bestimmt. Ein Raumschiff befi-, bewegt sich relativ zur Erde mit 100.000 km/s vorbei. Das Gerät auf der
 178 Erde misst für die Länge der Bahn 18,3 m. Was misst das Gerät auf dem Raumschiff, für diese Länge?
 179 S10: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm, also ich glaube die Werte sind, oder werden wahrschein-
 180 lich, oder ganz sicher wieder unterschiedlich sein. Ahm und ich würde sagen, dass das Messgerät auf der
 181 Erde genauer ist, oder ... richtig ist. Und ... ahm ich würde sagen, ähm, dass diese Messgerät, ähm ...
 182 wahrscheinlich, ähm ... bisschen mehr Länge, oder ein bisschen kürzer ... kürzere Längen, oder längere
 183 Längen angibt ... als ... was eigentlich ... ist.
 184 B: Mhm. Also du würdest sagen das Gerät auf der Erde misst die tatsächliche Länge und das hier (auf
 185 dem Raumschiff; Anm.) ... würde ...
 186 S10: Einen nicht so genauen Wert.
 187 B: Mhm. Das (Messgerät auf dem Raumschiff; Anm.) würde tatsächlich im Experiment wieder eine kürzere
 188 Länge messen ... und du hast gemeint, dann wäre das hier aber ... auf der Erde der richtige Wert.
 189 S10: Ja.
 190 B: Ok. Danke sehr.

Interview 11:

1 B: Wir ... betrachten zwei Raumschiffe A und B. Du ... befindest dich auf Raumschiff A.
 2 S11: Mhm.
 3 B: Außer dem Raumschiff B ist nichts sichtbar, keine Sterne, keine Planeten, gar nichts. Du siehst aber,
 4 dass es Bewegung zwischen Raumschiff A und Raumschiff B gibt. Kannst du irgendwie feststellen, ob sich
 5 Raumschiff A bewegt, Raumschiff B bewegt, oder sogar beide?
 6 S11: Ja, was heißt ich sehe Bewegung? (lacht) Also ich sehe, dass es einfach ... kann ich irgendwie fest-
 7 stellen, ob sich Raumschiff A bewegt, oder Raumschiff B ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... boah, ähm
 8 ... Ich würde ... also instinktiv, hätte ich gesagt nein, aber ich habe, äh ... einmal einen Stop Motion
 9 Film gedreht und anstatt, äh ... das Auto, also das Matchboxauto zu bewegen, habe ich den Hintergrund
 10 bewegt ... und ... ich meine, die ... natürlich haben sich die Reifen nicht gedreht, aber ... andererseits,
 11 ... ähm, war halt das schon ein ganz anderes Gefühl ... äh ... ja das ist eine sehr unphysikalisch hier
 12 meine Antwort, sehr unbegründet ...
 13 B: (lacht)
 14 S11: ... aber ich glaube eigentlich ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, hm ... (3 Sekunden Pause;
 15 Anm.) ... ja man spürt ja, wenn man in was ist, was bewegt ist, ja ein Luftzug, wenn man in der U-Bahn
 16 steht, aber wir sind ja im Weltall, das heißt es gibt keine Luft ... aber ...

17 B: Und das was man spürt ist auch nur Beschleunigung, nicht wenn man schon eine Geschwindigkeit hat.
18 S11: Stimmt auch wieder.
19 B: Mhm.
20 S11: Ähm ... Ist eigentlich das Lu- ist das Raumschiff mit Luft gefüllt eigentlich?
21 B: Ja.
22 S11: Ok.
23 B: Aber wenn du ... zum Beispiel im Auto sitzt und fährst ... spürst du auch nicht, dass die Luft im
24 Auto sich bewegt.
25 S11: Ja, obwohl ... im Auto beschleunigt man ja immer.
26 B: Ja.
27 S11: Ähm, ok, das heißt ja, wenn wir mit Beschleunigung zu tun haben, wird man nach hinten gezogen,
28 gegen die Fahrriichtung. Und ... na ich glaube einfach nicht. (lacht) Machen wir's einfach. Ich glaube es
29 wird unmöglich sein.
30 B: Damit hast du auch Recht.
31 S11: Ja.
32 B: In solchen Situationen ist es auch gar nicht mehr wichtig, deshalb, wer sich genau bewegt, man spricht
33 nur noch von einer Relativbewegung. Wir wissen ... mindestens einer bewegt sich ...
34 S11: Ok.
35 B: ... und Relativgeschwindigkeit von ... B relativ zu A bedeutet dann auch nur ... insgesamt gibt es
36 diese Bewegung, aber wer sich bewegt ist nicht wichtig.
37 S11: Ok.
38 B: Wir betrachten jetzt, dass Raumschiff B sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s bewegt.
39 S11: Mhm.
40 B: Und auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte, die Geschwindigkeit exakt bestimmen. Dabei bestim-
41 men sie immer die ... Relativgeschwindigkeit zwischen sich selbst ... und dem Objekt, das sie messen.
42 Auf Raumschiff B sitzt ein Passagier.
43 S11: Mhm.
44 B: Welche Geschwindigkeit misst das Messgerät auf Raumschiff B für diesen Passagier?
45 S11: Naja 100.000 km, oder wie, wie viel waren das? 100.000 km/s(?.)
46 B: Ja. Stell dir mal vor du sitzt im Zug und jemand sitzt in der Reihe vor dir.
47 S11: Ja, der fährt auch die Geschwindigkeit des Zuges.
48 B: Und wie schnell bewegt er sich relativ zu dir?
49 S11: Hm, nein, gar nicht, also ... also welches Messgerät misst ihn?
50 B: Das Messgerät auf Raumschiff B.
51 S11: Ach so, dann ist es null und das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) misst 100.000.
52 B: Ok. Der Passagier entscheidet sich in Richtung Spitze des Raumschiffs B zu gehen, mit ... 4km/h, ganz
53 gemütlich. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für ihn?
54 S11: Das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) misst 4 km/h, das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) 1.004, oder
55 ... wie viel das waren.
56 B: Ja. Jetzt schauen wir uns statt des Passagiers eine Lampe an, die in Richtung der Spitze von Raumschiff
57 B leuchtet.
58 S11: Ok.
59 B: Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s.
60 S11: Mhm.
61 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?
62 S11: ... Das Licht ... hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... also das ... wir, wir messen einfach im
63 Prinzip ein, ein, boah wie heißt das? (lacht) Oje, jetzt, jetzt ist, jetzt ist das peinlich, öh, ähm ... also
64 einfach ein Photon vom Licht.
65 B: Quasi. Kann man sich so vorstellen.
66 S11: Ok. Wir messen einfach ein Photon, das heißt ... das geht von da nach da, 300.000 km. Das ist in
67 Relation ... und die logischste Antwort wäre einfach 300.000 von dem (Gerät auf Raumschiff B; Anm.)

68 ... und dann da das, das Raumschiff (AB; Anm.) sich auch in die gleiche Richtung auch bewegt wäre das
69 400.000, aber es muss wahrscheinlich irgendwo einen Haken geben, also ... (lacht)
70 B: Ok. Und ... jetzt betrachten eine Lampe auf Raumschiff A.
71 S11: Ja.
72 B: Die leuchtet in Richtung Heck von Raumschiff A, also in die gleiche Richtung, in die sich Raumschiff B
73 bewegt.
74 S11: Ja.
75 B: Welche ... Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?
76 S11: Das Raumschiff A steht, oder?
77 B: Wie gesagt, wer sich bewegt ist ja prinzipiell egal.
78 S11: Naja, also, weil, die sind ja im selben Raumschiff, das heißt sie müssen sich gleich bewegen, ah ...
79 misst das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) 300.000 und das hier, ... ah, das bewegt sich in dieselbe Rich-
80 tung, das heißt es ist ja im Prinzip wie parallel, da ist es ja egal ob es jetzt im Raumschiff ist, oder draußen,
81 das heißt es misst 400.000.
82 B: ... Wenn sie in die gleiche Richtung gehen, kennst du das, wenn du ... auf der Autobahn fährst ...
83 S11: Ja.
84 B: ... mit, sagen wir mal, ganz brav, 130 ...
85 S11: Ok.
86 B: Und neben dir fährt jemand mit 150 in die gleiche Richtung.
87 S11: Ja.
88 B: ... Wi-, wirkt der dann für dich schneller, oder langsamer als 150?
89 S11: Natürlich langsamer.
90 B: Wie wäre das dann hier, wo Licht und Raumschiff sich in die gleiche Richtung bewegen?
91 S11: Ähm ... das Raumschiff bewegt sich nach da ... und ist schneller ... hm ... naja es wird schneller
92 wirken, aber es ist, ... es ist ja eigentlich gleich, oder(?) Weil sie ...
93 B: Licht bewegt sich mit 300.000 hier her ...
94 S11: Ja.
95 B: ... und das Raumschiff in die gleiche Richtung mit 100.000 daneben.
96 S11: Ja, dann ist es 400.000, ... wenn das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) das (Licht; Anm.) misst, weil
97 obwohl, oh, warte. Das Licht bewegt ... dann wird's 200.000, oder?
98 B: Wäre zumindest was wir auch im Alltag erwarten würden.
99 S11: Ja! Nein, ja, ok ... Denkfehler, natürlich ... wären es 200, 1000 ... 200.000, ja, das wird das ...
100 B: Ok. Mhm. Jetzt macht man Messungen ... der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Situationen schon
101 seit über 100 Jahren ...
102 S11: Ja.
103 B: ... und hat dabei festgestellt, egal wie sich Lichtquelle und Messgerät relativ zueinander bewegen ...
104 das Messgerät misst immer die 300.000 km/s Lichtgeschwindigkeit. Was sagst du dazu?
105 S11: Also das hier (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) misst 300.000 da(?)
106 B: Egal wie sie zueinander bewegen. Aufeinander zu, voneinander fort, egal, oder ob sie stillstehen, es wird
107 immer 300.000 km/s anzeigen.
108 S11: Ok, ähm ... das heißt, es bewegt sich ein, ein Raumschiff bewegt sich und es wird immer 300.000
109 anzeigen.
110 B: Für das Licht ... ja.
111 S11: ... Naja, ich sage wir wissen ja nicht welches Raumschiff sich bewegt und sie sind ja in Relation ...
112 das heißt, wahrscheinlich ist da einfach diese Relation so, dass sie halt im Prinzip parallel stehen, infolge
113 der Relation.
114 B: Tatsächlich, auch ohne Raumschiffe, einfach ... wenn Licht irgendwo ausgesandt wird, und jemand
115 bewegt sich ... in die gleiche Richtung wie das Licht, oder auch entgegengesetzt dem Licht ...
116 S11: Ja.
117 B: ... es wird immer die gleiche Geschwindigkeit für das Licht messen.
118 S11: Hm ... warum ist das so? (lacht) Ähm, ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Ach so, ist ja logisch

119 eigentlich, weil es ist ja eigentlich immer ... das Licht bewegt sich immer 300.000 km, ob ich jetzt entgegensteuere, oder nicht ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... minus v ...

120

121 B: Also auch die Relativgeschwindigkeit vom Beobachter zum Licht ändert sich nicht.

122 S11: Die Relativgeschwindigkeit ändert sich nicht ...

123 B: Ganz anders als wir das vorher bei dem Passagier hatten.

124 S11: Also immer 300.000?

125 B: Immer diese 300.000.

126 S11: Ok, weil, nein weil in der klassischen Physik gehen wir ja eigentlich davon aus, dass es ja einfach minus v gibt ... und dann ... wirkt das dagegen.

127

128 B: Mhm.

129 S11: Und das gilt halt jetzt für Licht nicht ... wahrscheinlich ... wird das irgendeine Teilcheneigenschaft, wieder eine spezielle Eigenschaft von Licht sein? ... Ähem, nehme ich an(??)

130

131 B: Wir werden sehen.

132 S11: Also ... ja. Ja, das ist diese ganze ... äh, Molekularebene und so, äh, nein es ist nicht die Molekularebene, ich bin wahnsinnig schlecht mit den Fachbegriffen, fragen sie nicht den Herr Professor XY, aber (lacht) ähm, nein ... das wird wahrscheinliche irgendeine eigene Anomalie des Lichts sein, würde ich sagen, aber ... für uns ... schwer vorstellbar.

133

134

135

136 B: Ok. Raumschiff A bewegt sich, relativ zu Raumschiff B, mit 100.000 km/s.

137 S11: Mhm.

138 B: Also eigentlich kein Unterschied zu vorher.

139 S11: Ja.

140 B: Auf beiden Raumschiffen gibt es jetzt Messgeräte die ... exakt messen ... wirklich exakt, ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht.

141

142 S11: Ok.

143 B: Auf Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2 ...

144 S11: Mhm.

145 B: ... und das Gerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig stattfinden. Was misst das Gerät auf Raumschiff A?

146

147 S11: ... Sind die Messgeräte verknüpft?

148 B: Nein.

149 S11: Hm ... was misst das Gerät auf Raumschiff A ... hm. Also wir wissen, ... wir wissen, dass das Licht, egal wie es geht, immer 300.000 sein wird, das heißt ... im Prinzip, ähm, die, äh, haben ... wenn da ein-, eine Lampe wäre und da eine Lampe, würde es beides 300.000 messen. Das heißt hier (F1; Anm.) geht der Fernseher an und hier (F2; Anm.) geht auch der Fernseher an, dann sollte es, dann sollte es theoretisch ja ... ähm, auch gleichzeitig messen, dass es gleichzeitig angeht. Ich meine, ich glaube in der klassischen Physik wäre es so, dass es ... halt verschoben ist und deswegen hast du halt die km/h noch eingerechnet in die Differenz da, aber halt ... wenn wir das da annehmen, dann ist es, glaube ich, auch gleichzeitig.

150

151

152

153

154

155

156 B: Mhm. Also, du hast jetzt gemeint, weil ... die Lichtgeschwindigkeit von allen gleich wahrgenommen wird. Aber jetzt befindet sich ja jetzt auch in diesem Beispiel ein Fernseher ... weiter weg vom Messgerät als der andere ...

157

158

159 S11: Jaja, ... aber ... das war ja bei der Lichtgeschwindigkeit auch egal, oder, wo wir sind(??) Und jetzt habe ich mir gedacht ... bei der klassischen Physik hätte ich jetzt auch gesagt ... da müsste diese Differenz sein, aber da wir eh beim Licht ... egal in welche Richtung wir fahren, keine Ahnung ...

160

161

162 B: Und ... würdest du sagen es gibt überhaupt irgendeine Möglichkeit, dass es (das Gerät auf Raumschiff A; Anm.) etwas anderes als Gleichzeitigkeit misst?

163

164 S11: Als Gleichzeitigkeit. Naja, ... hm, ja wenn man sie halt nicht gleichzeitig anschal-, äh, ah, einschaltet.

165 B: Also nur, wenn das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) auch misst, dass es nicht gleichzeitig ist(??)

166 S11: Jaja, ich glaube ... Ja, wenn sie in rela-, wenn diese wieder in dieser Relation stehen, ... aber dann glaube ich ist das immer gleich. ... Wie beim Licht ... anscheinend.

167

168 B: Jetzt noch zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B.

169 S11: Mhm.

170 B: Diesmal misst das Gerät auf Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.
171 S11: Ja.
172 B: Was misst das Gerät auf Raumschiff B?
173 S11: Naja, wenn meine Annahme vorher richtig war, dann (lacht) vielleicht, äh, dann muss es dasselbe
174 messen.
175 B: Ok.
176 S11: Also auch ... beide richtig.
177 B: In ... Messungen zum Thema Gleichzeitigkeit ...
178 S11: Ja.
179 B: ... wurde festgestellt, wenn zwei Ereignisse auf Raumschiff B gleichzeitig gemessen werden, ...
180 S11: Mhm.
181 B: ... dann werden sie auf dem relativ dazu bewegten Raumschiff A, bei perfekter Messung, sicher nicht
182 gleichzeitig gemessen. Was sagst du dazu?
183 S11: Sicher nicht gleichzeitig gemessen, ah ... ja es ist, es ist halt ... die Frage ist was messen wir eigent-
184 lich.
185 B: Ob sie gleichzeitig ... eingeschaltet werden.
186 S11: Aber, wie ...
187 B: Wie ist jetzt tatsächlich nicht ... relevant.
188 S11: Ok, wie ist nicht relevant.
189 B: Ja.
190 S11: Ok, weil das habe ich jetzt, wäre mein erster Tipp, ähm ... ok, wie ist nicht relevant ... (4 Sekunden
191 Pause; Anm.) ... hier, also ... bei B, das hier zeigt, gleichzeitig an und die werden gleichzeitig eingeschalt-
192 ten, das hier zeigt nicht gleichzeitig an ... warum ist das so ...? Wie ist nicht relevant ... wenn wie nicht
193 relevant ist, dann ist eigentlich der Abstand ja ... einfach irrelevant. Hm, ... so, andere ... (5 Sekunden
194 Pause; Anm.) ... ok, also wenn wir, wenn es irrelevant ist wie es gemessen wird, ist der Abstand egal, das
195 heißt das können wir in Klammer setzen, aber dann haben wir ... was, was können wir noch ... (lacht)
196 ... ähm ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ich muss, ich muss kurz nachdenken, es ist ein bisschen ...
197 (unverständlich)
198 B: Ähm ... du musst ja auch ... auch keine Erklärung finden, aber ...
199 S11: Ach so, nein, nein ich, ich mag, ich mag auch eine Erklärung finden. Äh, ist ja, ist ja auch für mich
200 ein bisschen nervig, dass ich das nicht kapiere. (lacht)
201 B: Und ... würdest du aber einfach generell mal sagen, das ... ist schon unerwartet für dich?
202 S11: ... Mmh ... ja, also ich wäre selber nicht darauf gekommen, ich hätte es selber anders erwartet. Aber
203 das ist, glaube ich, bei vielen Sachen, vor allem bei Physik so, ich, ich tue mir auch leicht mit Sachen
204 verstehen ... aber ... manchmal ... manchmal, brauche ich halt einfach die Hilfe um dahinterzukommen.
205 Weil, ist halt dann einfach so ... um die Ecke denken, geht ... manchmal, geht nicht immer.
206 B: Mhm.
207 S11: Aber ... ja.
208 B: Gut. Wir betrachten jetzt noch einmal, dass Raumschiff B sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000
209 km/s bewegt.
210 S11: Mhm.
211 B: Und auf beiden Raumschiffen sind Messgeräte ... die Längen exakt bestimmen können. Auf Raumschiff
212 B gibt es eine Bowlingbahn.
213 S11: Ok.
214 B: Das Messgerät auf Raumschiff B ... misst für die Bowlingbahn ... eine Länge von 18,3 m. Was misst
215 das Gerät auf Raumschiff A?
216 S11: 18,3 m, also es misst nur den, es misst ... was? Den Abstand, oder nur die Länge?
217 B: Wie gemessen wird ist prinzipiell egal, es misst jedenfalls nur die Länge der Bowlingbahn.
218 S11: Es misst nur die Länge der Bowlingbahn, so (lacht) jetzt haben wir herumexperimentiert, einmal das
219 Licht war konstant, dann ... die Fernseher waren wieder was anderes ... und jetzt haben wir die Länge,
220 ähm ...

221 B: Was ist dein Bauchgefühl dazu?
 222 S11: Was mein Bauchgefühl, ah ... boah, ich sage A, B, A (lacht), es wird wieder das Gleiche sein.
 223 B: Ok.
 224 S11: Also ... das kann ich jetzt auch wirklich nicht erklären, aber ...
 225 B: Und ... auch auf Raumschiff A gibt es eine Bowlingbahn.
 226 S11: Mhm.
 227 B: Und das Gerät auf Raumschiff A misst für diese eine Länge von 18,3 m. Was wird das Gerät auf Raum-
 228 schiff B für diese Länge messen?
 229 S11: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... da hat sich das bewegt und da bewegt sich das andere ... (7
 230 Sekunden Pause; Anm.) ... äh ... ich sage, es wird ... ich sage eigentlich es wird eine Unschärfe haben,
 231 bei der Messung.
 232 B: Wenn die Messung exakt ist.
 233 S11: Ok, die Meschung, die Messung ist geschafft. (lacht) Ok, dann sage ich ... hm ... (3 Sekunden Pause;
 234 Anm.) ... ich sage es, es wird nicht gleich sein, aber in dem Punkt kann ich ... leider, aber ich bin ganz
 235 ehrlich, ich werde, ich rate nur an diesem Punkt, weil ... für mich ist es schwer ... wenn ich mir das
 236 visuell nicht vorstellen kann ... das herzuleiten ... und wenn bei anderen Sachen, bei Messgeräten, man
 237 kann sich ja die Wellen vorstellen, man kann sich und so weiter und dann kann man sich das ein bisschen
 238 herleiten, wie sich das bewegt mit den bewegenden Körpern und da wenn wir hier einfach k-, k-, kein Viso
 239 haben ist das für mich ein bisschen schwer. Aber, ... äh, ich sage es wird anders sein ... aus Gefühl.
 240 B: Mhm, und würdest du sagen, dass dieses andere Ergebnis an sich richtig ist, oder, dass da irgendwas
 241 nicht mitberücksichtigt worden ist und es deshalb eine andere Länge misst?
 242 S11: Es misst eine andere Länge, es ... es ist an sich richtig, oder wurde etwas nicht mitbe- ... wie bitte?
 243 Nochmal.
 244 B: Du hast ja jetzt gesagt die beiden messen verschiedene Werte für die Länge der Bowlingbahn.
 245 S11: Ja.
 246 B: Und würdest du da sagen, dass da einer der Werte richtig ist und der andere halt ... falsch, weil ir-
 247 gendwas nicht mitberücksichtigt worden ist?
 248 S11: Falsch ... äh, nein, nicht wirklich ...
 249 B: Also ... du findest das an sich ... in Ordnung, dass es einfach zwei verschiedene Längen für die Bow-
 250 lingbahn gibt.
 251 S11: Ja.
 252 B: Ok.
 253 S11: Ja. (lacht)
 254 B: Ok.
 255 S11: Äh, ja. (lacht)
 256 B: Welche Länge hätte die Bowlingbahn tatsächlich?
 257 S11: ... Das kann man nicht wissen, was es ...
 258 B: Ok. ... Äh, in der ... Forschung hat sich gezeigt, bei ... wenn man eine exakte Messung hätte, ...
 259 dass das Gerät das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt ... immer eine kürzere Länge feststellen wird für
 260 die Bowlingbahn.
 261 S11: Ok.
 262 B: Was sagst du dazu?
 263 S11: Also das heißt hier würde Raumschiff B kürzer messen, hier würde Raumschiff A kürzer messen. Es
 264 würde kürzer messen. Naja, hm, ... ist eine Bewegung, ich, ich, wie gesagt, ich kann's mir wieder nicht
 265 herleiten, indem ich erkläre, dass ist die Bewegung, was damit zu tun hat, irgendwas muss sie ja damit zu
 266 tun haben, weil ... sonst wär's ja wieder parallel einfach (unverständlich), ähm ..., aber ... ich weiß es
 267 nicht, wenn, wenn es sich bewegt, ist die Messung ... anders, es ist ein bisschen interessant. Es ist, wenn
 268 es näher ist, wird's umso kürzer, oder wenn es weiter weg ist, wird's, äh ... länger.(?)
 269 B: Der ... Abstand macht keinen Unterschied, sondern nur wie sie sich bewegen.
 270 S11: Also Geschwindigkeit macht einen Unterschied ... ok. Hm, da kann man ja schon in Richtung Zeitrei-
 271 sen gehen. Oder? ... Mit Science-Fiction ein bisschen, irgendein Superheld, ja, wurscht. (lacht) Ähm

272 ...
 273 B: Findest du das unerwartet, oder ...?
 274 S11: Hm, finde ich es unerwartet ... es ist die Länge die hier ... ok. Ja, ich finde, ich finde es ist unerwartet,
 275 weil, ähm, wir nehmen ja normalerweise an, dass die ... das halt die Länge von etwas konstant ist.
 276 B: Mhm.
 277 S11: Aber ich glaube, ich glaube es ist ... gar nicht so unerwartet, wenn man ein bisschen aus der Box
 278 rausdenkt, weil Zeit ist ja eigentlich auch, äh, rela-, äh, also ... nicht relativ, sondern halt abhängig.
 279 B: Mhm.
 280 S11: Naja, weil ... Zeit ist ja auch abhängig ...
 281 B: Wie kommst du dazu, ... zu der Aussage?
 282 S11: Naja, ähm ... wie war das? Ich glaube es ist von der Masse abhängig, von der Gravitation(?) Dass
 283 halt, wenn man halt im Flugzeug ist, wenn man viel reist, dann ist, lebt man, glaube ich, so eine Sekunde
 284 länger, oder so.
 285 B: Wo hast du das gehört?
 286 S11: Ah, wo habe ich das gehört... ah ... entweder in irgendeiner Wissens-, also in der ... wie heißt das?
 287 Diese ... monatliche Wissenschaftszeitung, die hat mein Opa abonniert. Oder ... in irgendeinem Artikel,
 288 weiß ich nicht.
 289 B: Ok.
 290 S11: Aber auf jeden Fall, äh, ja.
 291 B: Und ... würdest du jetzt sagen, nachdem die beiden (Messgeräte; Anm.) ja tatsächlich verschiedene
 292 Werte für die Länge anzeigen, dass es hier einen richtigen und einen falschen Wert gibt, oder, dass beide
 293 Recht haben?
 294 S11: Hm ... naja, ... also wie gesagt, ich glaube, ich wieder, beide haben Recht, aber das ist für uns im
 295 Alltag, glaube ich irrelevant einfach, also ...
 296 B: Mhm.
 297 S11: Ist ja auch egal wie es ist.
 298 B: Wir betrachten noch eine Bowlingbahn auf der Erde.
 299 S11: Ja.
 300 B: Und auch hier ein Messgerät das Längen exakt bestimmt. Ein Raumschiff bewegt sich mit 100.000 km/s
 301 relativ zur Erde.
 302 S11: Mhm.
 303 B: Das Gerät auf der Erde misst für die Länge der Bowlingbahn 18,3 m. Welche Länge misst das Gerät
 304 auf dem Raumschiff?
 305 S11: Naja, es, ist es ja nicht eigentlich genau dasselbe wie da hier? Äh, weil, das ist ja auch einfach ein ...
 306 sie stehen ja auch in Relation und das bewegt sich nicht, also ... wir an-, nehmen an das (Messgerät auf
 307 der Erde; Anm.) bewegt sich nicht und die Erde natürlich auch nicht, oder ... auch nur geringer ... und
 308 das be- ... bewegt sich halt, also Raumschiff bewegt sich halt, also ich würde sagen es ist genau dasselbe
 309 wie da.
 310 B: Mhm, also was ...
 311 S11: Also das es kürzer ist wieder von dem ... Raumschiff.
 312 B: Ok. Und würdest du hier sagen, dass es einen richtigen und einen falschen Wert gibt?
 313 S11: Nein. Aber ich glaube wir nehmen den an, Wert an der Erde für richtig an, weil ... das ist was uns
 314 interessiert, im Raumschiff ist für uns jetzt egal, oder(?)
 315 B: Ok.

Interview 12:

1 B: Am Anfang betrachten wir zwei Raumschiffe A und B.
 2 S12: Mhm.
 3 B: Du befindest dich auf Raumschiff A. Man sieht keine Sterne, keine Planeten ... nur das andere Raum-
 4 schiff.
 5 S12: Ok.

6 B: Und du siehst ... das bewegt sich relativ zu dir. Hast du irgendeine Möglichkeit festzustellen, ob sich
7 Raumschiff A bewegt, Raumschiff B bewegt, oder, ob sich sogar beide bewegen?

8 S12: ... Hm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... nein, weil das rundherum sich ja ... also, weil sich, weil
9 ich rundherum nichts sehen kann und keinen ... Punkt festmachen kann, woran ich sehen kann, ob sich,
10 eben, ob jetzt ich mich bewege, oder ob sich das andere Fahrzeug.

11 B: Mhm. In solchen Situationen ist das tatsächlich auch gar nicht feststellbar und deshalb spricht man
12 immer von der Relativgeschwindigkeit und wenn man dann sagt Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raum-
13 schiff A heißt das noch nicht, dass Raumschiff A stillsteht und B sich bewegt, könnte auch umgekehrt sein,
14 wir wissen es einfach nicht besser. Raumschiff B soll sich jetzt relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s
15 bewegen ... und auf beiden Raumschiffen gibt es ... Messgeräte, die exakt Geschwindigkeiten messen.

16 S12: Mhm.

17 B: Und dabei messen sie immer, wie sich ein Objekt relativ zu ihnen selbst bewegt. Auf Raumschiff B sitzt
18 ein Passagier.

19 S12: Mhm.

20 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?

21 S12: ... Hm, die Geschwindigkeit auf die sich Raumschiff A auf den Passagier bewegt ... (.)

22 B: Die befinden sich ja im gleichen Raumschiff hier, Messgerät und Passagier, die Frage ist also, wie bewegt
23 sich der Passagier relativ zum Messgerät. ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... wie, ob sich der entfernt von
24 diesem Messgerät, oder auf das zubewegt, oder nicht ...

25 S12: ... (14 Sekunden Pause; Anm.) ..., also das Messgerät misst ... die relative Geschwindigkeit von
26 einem Objekt, das sich zu Raumschiff, also zum Raumschiff B jetzt in dem Fall ... bewegt.

27 B: In dem Fall geht's jetzt nur um das Messgerät und den Passagier. Wie bewegen die sich relativ zuein-
28 ander?

29 S12: Ach so.

30 B: Mhm und das misst dieses Messgerät.

31 S12: ... Also sie bewegen sich gleichzeitig, beziehungsweise ... gar nicht zueinander.

32 B: Ok.

33 S12: Ja.

34 B: Das heißt die Relativgeschwindigkeit wäre einfach null.

35 S12: Null, ja.

36 B: Ok. Und was würde das Messgerät auf Raumschiff A für diesen Passagier ... messen?

37 S12: ... Ähm, naja die Geschwindigkeit die Raumschiff B auf Raumschiff A hat.

38 B: Mhm. Der Passagier steht auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B mit ... 4 km/h. Welche
39 Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für diesen Passagier?

40 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... 4 km/h(.)

41 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

42 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... die Geschwindigkeit von Raumschiff B die sich auf Raum-
43 schiff A bewegt plus ... 4 km/h.

44 B: Mhm. Wir ersetzen den Passagier durch eine Lampe. Die leuchtet in Richtung Spitze von Raumschiff
45 B. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das gerät auf Raumschiff
46 B für das Licht?

47 S12: ... 300 km/h pro Sekunde(.)

48 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

49 S12: ... Ähm ... die Geschwindigkeit von Raumschiff B auf Raumschiff A plus die 300 km/h pro Sekun-
50 de(.)

51 B: Ja ... Jetzt schauen wir uns eine Lampe auf Raumschiff A an, die in Richtung Heck von Raumschiff
52 A leuchtet, also in die gleiche Richtung, in die sich auch Raumschiff B relativ zu A bewegt. Welche Ge-
53 schwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?

54 S12: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... auch 300 km/h pro Sekunde.

55 B: Und das Gerät auf Raumschiff B? Was misst das für das Licht?

56 S12: ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... also Geschwindigkeit von ... A die auf B wirkt ... logischerweise

57 würde ich jetzt sagen minus die 300 km/h pro Sekunde, aber da bin ich mir nicht sicher.

58 B: Ok. Weil ... wenn sich Sachen in die gleiche Richtung bewegen, kennst du ja von der Autobahn, dann

59 ... schaut das Auto das dich überholt gar nicht so schnell aus in Wahrheit, weil du dich ja selber auch

60 bewegst, ja.

61 S12: Mhm.

62 B: Ok. Tatsächlich ... haben Messungen der Lichtgeschwindigkeit, die man schon sehr lange durchführt,

63 ergeben ... egal wie sich Lichtquelle und Messgerät relativ zueinander bewegen, das Messgerät misst im-

64 mer 300.000 km/s. Was sagst du dazu?

65 S12: Ähm ..., naja wenn sie's erklärt haben gibt, ergibt's Sinn, aber ich glaube ich, glaube nicht, dass ich

66 selbst darauf gekommen wäre.

67 B: Mhm, findest du das überraschend?

68 S12: Hm, nein es ist logisch.

69 B: Logisch?

70 S12: Würde ich schon sagen.

71 B: Warum würdest du das sagen?

72 S12: Weil ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Licht irgendwie ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... immer,

73 also nicht kryptisch, aber es ist etwas, das sehr, das viele, nicht Regeln hat, aber es ist sehr kompliziert

74 und ich denke, dass es dabei nicht viel Überraschendes gibt, man muss es einfach akzeptieren, dass Licht

75 auf ... eine komplizierte Weise funktioniert.

76 B: Ok. Wir betrachten Raumschiff A das sich relativ zu Raumschiff B mit 100.000 km/s bewegt, also

77 ... wie vorher. Und auf beiden Raumschiffen sind jetzt Messgeräte die exakt messen, ob zwei Ereignisse

78 gleichzeitig stattfinden, oder nicht ... und zwar unabhängig voneinander. Auf Raumschiff B gibt es zwei

79 Fernseher, F1 und F2, die eingeschaltet werden. Das Gerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig

80 eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff A?

81 S12: ... Auch, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden ...

82 B: Würdest du sagen es gibt überhaupt eine Möglichkeit, dass es etwas anderes feststellt?

83 S12: ... Hm ... nein, eigentlich nicht.

84 B: Ok. Wir betrachten noch zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B und diesmal misst das Gerät

85 auf Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff B?

86 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ah, vielleicht dadurch, dass sie sich, ähm ..., dass sich Raumschiff

87 A auf Raumschiff B ... zubewegt, dass es vielleicht denken könnte, dass ... die beiden Fernseher gleich-

88 zeitig eingeschaltet werden obwohl vielleicht ... ähm ... F3 später eingeschaltet wurde als F4, weil F4 vor

89 F3 steht?

90 B: Ok. Woran könnte das liegen?

91 S12: Dadurch, dass ... es halt zuerst bei F4 bobei-, vorbeikommt, als bei F3.

92 B: Mhm. Und wenn das Messgerät ... die Daten alle sammelt und nachher erst auswertet und berücksichtigt,

93 wie sie sich bewegen, was wäre dann deine Antwort?

94 S12: Dann ... würde es ... genau dasselbe messen wie ... auf B.

95 B: Ok. Und ... wenn es was anderes messen würde, würdest du dann sagen ..., dass es ein, eher ein Fehler

96 ist, weil man die Bewegung nicht berücksichtigt hat, oder könnte es auch andere Gründe dafür geben?

97 S12: ... (24 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich glaube eher nicht.(?)

98 B: Ok. Auch Experimente zur Gleichzeitigkeit hat man gemacht und es zeigt sich ..., dass zwei Ereignisse,

99 die auf Raumschiff B gleichzeitig gemessen werden auf einem relativ dazu bewegten Raumschiff A sicher

100 nicht gleichzeitig gemessen werden. Bei exakter Messung. Unter Berücksichtigung aller Faktoren.

101 S12: Hm.

102 B: Was sagst du dazu?

103 S12: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... ich meine es ergibt ir-

104 gendwo Sinn, aber ich ... ich schätze jetzt mal, dass es was mit der Bewegung zu tun hat.

105 B: Mhm. ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Inwiefern hat das was mit der Bewegung zu tun?

106 S12: Hm ... naja, dass ... also ich hätte jetzt gesagt, dass es eben zuerst ... bei F4, als bei F3 vorbei-

107 kommt, oder beziehungsweise auch was mit ... der Entfernung zu tun haben könnte.

108 B: Und wenn man das in der Messung berücksichtigt aber trotzdem sich das ergibt, was würdest du dann
109 sagen?

110 S12: Ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... (lacht) ... ja da ... habe ich keine Ahnung. (lacht)

111 B: Ok. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s. Und auf beiden Raumschiffen
112 gibt es Messgeräte die Längen exakt ... bestimmen.

113 S12: Mhm.

114 B: Und wie vorher auch die Bewegung und alles mitberücksichtigen. Auf Raumschiff B gibt es eine Bow-
115 lingbahn ... und das Gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Was misst
116 das Gerät auf Raumschiff B für die Länge?

117 S12: ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... eine Bowlingkugel wird in Richtung der Spitze gew- ...

118 B: Kugel brauchen wir keine, nur wie lange die Bahn ist.

119 S12: Ok. Ach so, ...

120 B: Nur die wird gemessen.

121 S12: Ähm ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... so lange wie das Raumschiff ist, weil die Länge ja am ganzen
122 Raumschiff vorbeikommt.(?)

123 B: Ok. Aber es wird tatsächlich auch von diesem Messgerät (auf Raumschiff A; Anm.) nur die Bahn selbst
124 gemessen.

125 S12: Ok.

126 B: Und dieses Gerät (auf Raumschiff B; Anm.) misst eine Länge von 18,3 m für die Bahn. Was misst dieses
127 Gerät (auf Raumschiff A; Anm.) für die Länge der Bahn?

128 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... auch 13,8?

129 B: Ok. Jetzt gibt's auch auf Raumschiff ... A eine Bowlingbahn und das Gerät auf Raumschiff A misst
130 für diese eine Länge von 18,3 m. Was misst das Gerät auf dem ... relativ dazu bewegten Raumschiff B,
131 für die Länge der Bahn?

132 S12: ... (19 Sekunden Pause; Anm.) ... Ich hätte jetzt auch gesagt genau dasselbe. (lacht)

133 B: Ok. Tatsächlich hat die Forschung ergeben ... bei exakten Messungen wird das Gerät, das sich relativ
134 zur Bowlingbahn bewegt immer eine kürzere Länge messen. Was sagst du dazu?

135 S12: (lacht) Warum? ... Ähm, also ich wüsste, also ich hätte jetzt keine Erklärung dafür.

136 B: Ok. Nachdem die jetzt verschiedene Werte anzeigen für die Länge der Bowlingbahn, würdest du da
137 sagen, dass es einen richtigen und einen falschen Wert gibt, oder haben beide Recht?

138 S12: ... Hm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... es ist schwer zu sagen, weil für die Messung von B ist
139 natürlich ... die Messung von dem B-Gerät richtig und für A ist natürlich A richtig, aber das geht ... je
140 nachdem, wie lang die Bahn halt selbst ist ... von, von der Sichtweise, von B ist ... die Bahn halt so lang
141 und von der Sichtweise von A ist die Bahn halt 13,8 ... m lang.

142 B: Und was würdest du sagen, von diesen beiden Werten wäre dann der tatsächliche Wert für die Länge
143 der Bahn?

144 S12: ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ...

145 B: Oder gibt's keinen tatsächlichen Wert?

146 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Hm ... ich würde sagen, dass der richtige Wert 13,8 ist, aber es
147 ist ... ich glaube es ist diskutierbar, weil ... es einfach ... zwei Sichtweisen gibt und zwei Messgeräte auf
148 zwei verschiedenen Gerä-, äh, auf zwei verschiedenen Fahrzeugen, ja.

149 B: Ok. Auf der Erde befindet sich auch eine Bowlingbahn ... und ein Messgerät das Längen exakt be-
150 stimmt. An der Erde bewegt sich ein Raumschiff ... mit 100.000 km/s Relativgeschwindigkeit vorbei. Das
151 Gerät auf der Erde misst für die Länge der Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Was misst das Gerät auf
152 dem Raumschiff?

153 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ...

154 B: Wieder für die Länge der Bahn.

155 S12: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass sie kürzer ist? ... Also, dass die Bahn ... kürzer ist hätte
156 ich jetzt gesagt.

157 B: Mhm. Weil?

158 S12: Ähm, weil Sie mir vorher gesagt haben, dass die Bahn ... auf dem anderen Gerät kürzer gemessen

159 würde.
 160 B: Und was wäre dein Bauchgefühl?
 161 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... Also wenn sie es mir nicht erklärt hätten, dann hätte ich jetzt auch
 162 gesagt, dass es dieselbe Länge wäre ...
 163 B: Mhm. Tatsächlich ... wäre es auch hier natürlich so, dass das relativ zur Bahn bewegte Gerät eine
 164 kürzere Länge misst, wir haben also auch hier zwei verschiedene Werte. Würdest du sagen, dass es da jetzt
 165 einen richtigen und einen falschen gibt?
 166 S12: ... Hm, nein.
 167 B: Also würdest du wieder sagen das wäre diskutierbar?
 168 S12: Mhm.
 169 B: Ok. Danke.

Interview 13:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe, A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A. Man sieht außer dem
 2 anderen Raumschiff nichts, keine Sterne, schwarzer Hintergrund. Du siehst nur ..., dass sich die beiden
 3 Raumschiffe irgendwie relativ zueinander bewegen.
 4 S13: Mhm.
 5 B: Kannst du irgendwie feststellen ..., ob du dich bewegst, ob Raumschiff B sich bewegt, oder, ob sich
 6 sogar beide bewegen?
 7 S13: ... Hm ... Naja, wenn ... Raum, wenn der Raum relativ ist, dann kommt's, glaube ich, immer auf
 8 den Betrachter an.
 9 B: Mhm.
 10 S13: Das heißt, wenn ich im Raumschiff A bin ..., dann bewegt sich mein Umfeld für mich nicht und ich
 11 denke, dass sich das andere bewegt, daher ... glaube ich ist das dann so eine Illusion und daher weiß ich
 12 nicht was sich bewegt, also ich kann's nicht feststellen.
 13 B: Mhm. Ja, Bewegung, tatsächlich, wie du sagst ist ... kommt auf den Betrachter an. Jeder kann sich
 14 selbst als den ruhenden Betrachter ... anschauen und dann ist es ... nicht wichtig wer sich tatsächlich
 15 bewegt, deshalb spricht man hier immer nur von der Relativgeschwindigkeit ... und wenn man sagt Raum-
 16 schiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A, sagt man damit nicht unbedingt, dass B sich bewegt, könnte
 17 auch umgekehrt sein.
 18 S13: Mhm.
 19 B: Und wir betrachten jetzt, dass ... Raumschiff B sich relativ zu Raumschiff A ... mit 100.000 km/s
 20 bewegt. Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte die Geschwindigkeiten exakt messen. Dabei messen
 21 sie immer die Geschwindigkeit die ... ein bestimmtes Objekt von ihrem Standpunkt aus betrachtet hat.
 22 S13: Ok.
 23 B: Also wie es sich relativ zu ihnen bewegt.
 24 S13: Mhm.
 25 B: Auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Was wird das Messgerät auf Raumschiff B für die Geschwindigkeit
 26 des Passagiers messen?
 27 S13: ... Boah ... ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.), naja es ... das bewegt sich mit hunderttau-, 100.000
 28 km/h.
 29 B: Relativ zum Raumschiff A.
 30 S13: Relativ, ok.
 31 B: Die Frage ist ... für das Messgerät immer, wie schnell bewegt sich dieser Passagier relativ zum Mess-
 32 gerät.
 33 S13: Ach so ja, weil wenn in derselben ... im selben Raumschiff sind, dann bewegen sie sich gleich schnell,
 34 weil eben ... das ein Raum ist, sozusagen eine Position, ein Betrachter.
 35 B: Mhm.
 36 S13: Ja. Also ..., relativ ... ja (lacht)
 37 B: Würdest du sagen der Passagier entfernt sich vom Messgerät, oder ...
 38 S13: Nein. Die bleiben gleich, die bewegen sich ... gleich schnell, sozusagen ...

39 B: Mhm. Und welche Geschwindigkeit misst das Messgerät dann für ihn, wenn er sich ... nicht von ihm
40 entfernt und nicht auf ihn zubewegt?

41 S13: Äh ... 100.000, also 100, relativ zu A 100.000 km/h, oder ... (.)

42 B: Was würde denn das Messgerät im Raumschiff A für den Passagier messen?

43 S13: ... (lacht) ... 100.000 km/h?

44 B: Was würde aber das in Raumschiff B für ihn messen?

45 S13: Ach so, null. Ja, weil, ja (lacht) ok.

46 B: Der Passagier steht auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B, mit 4 km/h.

47 S13: Mhm.

48 B: Was misst das Gerät auf Raumschiff B für seine Geschwindigkeit?

49 S13: ... Ähm ... 4 km/h.

50 B: Und das auf Raumschiff A?

51 S13: 100.000 km/h ... in Relation ... äh, ja, oder? ... Ach so für ihn 104 ... km/h (lacht)(.)

52 B: Mhm. Ok. Jetzt ersetzen wir den Passagier durch eine Lampe, die in Richtung Spitze von Raumschiff
53 B leuchtet. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das gerät auf
54 Raumschiff B für das Licht?

55 S13: ... Ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... 300.000 km/s(.)

56 B: Und das auf Raumschiff A?

57 S13: Für das Licht?

58 B: Mhm.

59 S13: Ähm ... 300.000 km/s, weil's schneller ist als das Raumschiff. Ich weiß nicht wie schnell, also schnell
60 ... dann ... wenn das relativ 100 km/h ist, oh Gott (lacht).

61 B: Wie hast du's denn beim Passagier vorhin gelöst der gegangen ist?

62 S13: Dazu, also addiert.

63 B: Mhm.

64 S13: Also ...

65 B: Was würdest du dann vom Gefühl hier machen?

66 S13: Hm (lacht) 300.100 km, ja man muss das umrechnen.

67 B: Das waren auch 100.000.

68 S13: Ja.

69 B: Das war eh die gleiche Einheit, das passt.

70 S13: Ach so, ok gut. Also 400.000 ...

71 B: Ja.

72 S13: ... km.

73 B: Jetzt haben wir auf Raumschiff A eine Lampe, die in Richtung Heck von Raumschiff A leuchtet, ...
74 also in die gleiche Richtung, in die sich ... relativ zum Raumschiff A auch das Raumschiff B bewegt.

75 S13: Mhm.

76 B: Welche Geschwindigkeit misst das gerät auf Raumschiff A für dieses Licht?

77 S13: ... Ähm ... 300.000 km/s.

78 B: Und das auf Raumschiff B?

79 S13: Äh ... 200.000 km/s, weil ... sich das ja ein bisschen aufhebt, weil das sich ja auch ... in die Richtung
80 bewegt.

81 B: Ok. Messungen der Lichtgeschwindigkeit macht man schon seit über 100 Jahren und hat dabei ...
82 festgestellt ... egal wie sich Lichtquelle und Messgerät relativ zueinander bewegen, das Messgerät wird
83 immer 300.000 km/s messen.

84 S13: Aha.

85 B: Was sagst du dazu?

86 S13: ... Naja, irgendwie, also für mich ergibt das irgendwie keinen Sinn, weil ... Licht ... ich weiß nicht
87 Licht kann sich anscheinend immer gleich schnell bewegen, oder sowas, aber wenn eine, wenn das Messgerät
88 sich ja auch bewegt, dann verändert ... dann muss man das dann subtrahieren die Geschwindigkeit ...
89 B: Mhm.

90 S13: ... also es macht irgendwie keinen Sinn. (lacht)

91 B: Ok. ... Raumschiff A bewegt sich jetzt relativ zu Raumschiff B mit 100.000 km/s. Und jetzt haben

92 wir Messgeräte auf beiden Raumschiffen die exakt messen, ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder

93 nicht.

94 S13: Mhm.

95 B: Auf Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2, die eingeschaltet werden.

96 S13: Mhm.

97 B: Das Gerät auf Raumschiff B misst ... sie werden gleichzeitig eingeschaltet.

98 S13: Mhm.

99 B: Was misst das Gerät auf Raumschiff A?

100 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, wenn die beiden

101 (Fernseher; Anm.) gleichzeitig eingeschaltet werden und ... das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) misst ...

102 B: Ob sie gleichzeitig eingeschaltet werden, oder nicht.

103 S13: Dann ... misst das wahrscheinlich auch, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden, wenn das so pas-

104 siert.

105 B: Und würdest du sagen es gibt überhaupt eine Möglichkeit, dass es ... misst, dass sie nicht gleichzeitig

106 eingeschaltet werden?

107 S13: ... Vielleicht wenn's mit Lichtgeschwindigkeit wie wir, wie wir das jetzt gesagt haben, wenn es mit

108 Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist ... und sich dann ... Zeit und Raum ... relativ sind, vielleicht, dass

109 das sich dann verschiebt, aber sonst glaube ich nicht.

110 B: Mhm. Wie meinst du, wenn das sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt?

111 S13: Wenn sich ... A ... mit Lichtgeschwindigkeit bewegt ...

112 B: Mhm.

113 S13: ..., dass sich sozusagen die Zeit ... vom Einschalten der Fernseher irgendwie verzerrt, obwohl, nein,

114 die werden eh gleichzeitig eingeschaltet, also nicht.

115 B: Ok.

116 S13: Glaube ich.

117 B: Wir betrachten noch zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B und diesmal misst das Gerät auf

118 Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff B?

119 S13: ... Hm ..., dass sie auch gleichzeitig eingeschaltet werden(.)

120 B: Und würdest du auch hier sagen, dass es eigentlich keine Möglichkeit gibt ..., dass das (Messgerät auf

121 Raumschiff B; Anm.) etwas anderes feststellt?

122 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Nein, ich glaube es gibt keine Möglichkeit.

123 B: Ok. Man macht auch zum Thema Gleichzeitigkeit Messungen und hier hat sich ergeben, dass ... zwei

124 Ereignisse, die im Raumschiff B gleichzeitig gemessen werden in einem relativ dazu bewegten Raumschiff

125 A sicher nicht gleichzeitig gemessen werden.

126 S13: Mhm.

127 B: Was sagst du dazu?

128 S13: ... Also, dass wenn ... die glei-, äh, wenn die, wenn das (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) gleich-

129 zeitig misst ..., dass die (Fernseher; Anm.) nicht gleichzeitig eingeschaltet werden können, oder ...

130 B: Wenn das Gerät (auf Raumschiff B; Anm.) misst ... die sind gleichzeitig eingeschaltet worden, dann

131 würde das hier (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) messen die sind nicht gleichzeitig gemessen, äh, einge-

132 schalten worden.

133 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ok ... vielleicht, dass sich das so schnell bewegt, also, dass sie

134 sich relativ zueinander so schnell voneinander wegbewegen, dass es das gar nicht so schnell gleichzeitig

135 messen kann, oder, dass ... vielleicht die Ereignisabfolge nicht gleichzeitig erfolgen kann weil es so schnell

136 passiert?

137 B: Und, ah, das Gerät berücksichtigt das und wird aber trotzdem messen, dass die nicht gleichzeitig ein-

138 geschaltet werden.

139 S13: ... (lacht) Dann sind sie nicht gleichzeitig eingeschaltet worden.

140 B: Ok. Raumschiff B ... bewegt sich relativ zu Raumschiff A wieder mit 100.000 km/s und auf beiden

141 Raumschiffen sind Messgeräte, die Längen exakt messen können. Auf Raumschiff B befindet sich eine
142 Bowlingbahn.
143 S13: Mhm.
144 B: Das Messgerät (auf Raumschiff B; Anm.) misst für diese Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Was wird
145 das Messgerät auf Raumschiff A für die Länge der Bowlingbahn messen?
146 S13: ... Ähm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... weniger, weil sich die ja entgegengesetzt, ah, entgege-
147 setzt relativ bewegen ...
148 B: Mhm.
149 S13: ... und das so das ganze Bild verzerrt ... würde ich sagen.
150 B: Mhm, ok. Und das Messgerät ... wenn das das berücksichtigen würde und das ... erst mal die Daten
151 sammelt und nachher auswertet und dabei berücksichtigt, dass sie sich bewegt haben?
152 S13: Dann würd's glaube ich schon 18,3 m sein.
153 B: Ok. ... Auch auf Raumschiff A gibt es eine Bowlingbahn ... und dieses Messgerät auf Raumschiff A
154 misst dafür ... eine Länge von 18,3 m. Was misst das Gerät auf Raumschiff B für die Länge?
155 S13: ... Auch 18,3 m.
156 B: Ok. Tatsächliche Messungen in ähnlichen Situationen ... ergeben, dass das Messgerät, das sich relativ
157 zur Bahn bewegt ...
158 S13: Mhm.
159 B: ... unter Berücksichtigung von Verzerrungen ... trotzdem ... immer eine kürzere Länge messen wird.
160 Was sagst du dazu?
161 S13: (lacht) ... Macht keinen Sinn, ich verstehe, ich ... für mich macht das keinen Sinn, weil sie ...
162 bewegen sich ja trotzdem zueinander ... immer ... in dersel-, also ... es kommt natürlich darauf an, von
163 wo man es betrachtet, aber ja, ok, gut.
164 B: Ok. Nachdem wir dann zwei verschiedene Messergebnisse haben, würdest du sagen es gibt hier einen
165 richtigen und einen falschen Wert, oder ... ?
166 S13: Naja, es kommt auf den Betrachter an, wenn du hier bist, dann ist ... also, wenn du in Raumschiff A
167 bist, dann ist der Messwert für dich richtig und ... eben gleich für ... den Betrachter von Raumschiff B.
168 B: Mhm.
169 S13: Würde sein.
170 B: Und gäbe es quasi absolut betrachtet einen ... richtigen Wert, oder ... kommt es ... immer auf den
171 Betrachter an?
172 S13: ... Ich glaube es kommt immer auf den Betrachter an.
173 B: Ok. Schlussendlich haben wir auch eine Bowlingbahn auf der Erde ...
174 S13: Mhm.
175 B: ... und auch hier ein Messgerät ... das Längen exakt bestimmt. Ein Raumschiff bewegt sich mit 100.000
176 km/s, Relativgeschwindigkeit, an der Erde vorbei. Das Messgerät auf der Erde misst eine Länge von 18,3
177 m für die Bowlingbahn. Was misst das Gerät auf dem Raumschiff für die Länge der Bowlingbahn?
178 S13: ... Äh ... eine kürzere Länge als 18,3 m.
179 B: Warum?
180 S13: Wenn, weil es sich relativ dazu mit 100.000 km/h, oder Sekunde bewegt.
181 B: Und von deinem Bauchgefühl her, wenn wir die vorige Frage nicht gehabt hätten?
182 S13: Dann hätte ich gesagt, dass sie gleich lang wäre.
183 B: Mhm. Deine Aussage von vorher war richtig, es wird messen ..., dass diese Länge kürzer ist.
184 S13: Ja.
185 B: Würdest du hier sagen es gibt einen richtigen und einen falschen Wert? ... Oder sind beide Richtig?
186 S13: ... Ähm ... jetzt würde ich sagen, dass der (Wert des Messgeräts auf der Erde; Anm.), also die
187 tatsächliche Länge der Bowlingbahn richtig wäre.
188 B: Ok.
189 S13: Also, wenn man's so misst wie, wenn man steht.
190 B: Mhm. Gut, danke sehr.

C. Transkripte der 2. Interviewrunde

In diesem Abschnitt sind die Transkripte der Interviews der zweiten Runde ersichtlich.

Interview 1:

- 1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A ...
- 2 S1: Mhm.
- 3 B: ... und du siehst, dass sich Raumschiff B, relativ zu dir, bewegt.
- 4 S1: Mhm.
- 5 B: Kannst du irgendwie feststellen, ob sich wirklich Raumschiff B bewegt, oder vielleicht doch Raumschiff
- 6 A, oder sogar beide?
- 7 S1: ... ähm ... nein, kann ich nicht wirklich feststellen, dass is eher so, die Illusion, wenn wir uns bewegen,
- 8 dass das so aussieht wie wenn sich das zweite auch bewegt.(?)
- 9 B: Mhm.
- 10 S1: Also, es könnte sein, dass sich beide bewegen, oder halt, dass sich nur eines bewegt.
- 11 B: Würdest du sagen es gibt von draußen eine Perspektive, die das entscheiden könnte?
- 12 S1: ... also, von außen gesehen, wenn man ... außerhalb steht, dann sieht man welches sich bewegt.
- 13 B: Ok, aber in der ... für uns betrachteten Situation spielt's keine Rolle wer sich bewegt, sondern ...
- 14 S1: Ja.
- 15 B: ... nur ..., es bewegt sich jemand. Jetzt haben wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Geschwin-
- 16 digkeiten exakt bestimmen. Dabei messen sie immer die Relativgeschwindigkeit des Objekts zu sich selbst
- 17 ...
- 18 S1: Mhm.
- 19 B: ... also, entfernt sich das vom Gerät, oder ... nicht. Das Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raum-
- 20 schiff A mit 100.000 km/s ...
- 21 S1: Mhm.
- 22 B: ... und auf Raumschiff B sitzt ein Passagier.
- 23 S1: Mhm.
- 24 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?
- 25 S1: ... für den Passagier selber.(?)
- 26 B: Mhm.
- 27 S1: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ja gar keine, weil der bleibt immer ... gleich.
- 28 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
- 29 S1: Diese Tausend, oder eine Million, was war's?
- 30 B: 100.000.
- 31 S1: Ja, 100.000.
- 32 B: Ok. Der Passagier steht auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B.
- 33 S1: Mhm.
- 34 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?
- 35 S1: Ähm, ... die Geschwindigkeit, die der Passagier geht.(?)
- 36 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
- 37 S1: Noch immer wie schnell das Raumschiff sich bewegt, diese ... hundert ... dreißigtausend.(?)
- 38 B: 100.000 waren's, genau.
- 39 S1: Ja, 100.000.
- 40 B: Und ... wie schnell der Passagier geht, hat das einen Einfluss darauf, was das Gerät misst?
- 41 S1: Nein.
- 42 B: Weil?
- 43 S1: Ähm, weil's ja nur das Raumschiff misst und nicht was drinnen passiert.
- 44 B: Und wenn es ... so fokussiert is, dass es tatsächlich ... die Geschwindigkeit des einzelnen Passagiers
- 45 misst?
- 46 S1: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... dann wäre es ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht (lacht)

47 die Geschwindigkeit vom Raumschiff, plus die vom Passagier? O-, ... ja. ... ja wahrscheinlich.
48 B: Ok. Wir ersetzen den Passagier durch eine Lampe auf Raumschiff B ...
49 S1: Mhm.
50 B: ... die in Richtung Spitze von Raumschiff B leuchtet.
51 S1: Mhm.
52 B: Die Lichtgeschwindigkeit sind ... ungefähr 300.000 km/s.
53 S1: Mhm.
54 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?
55 S1: ... ja die Lichtgeschwindigkeit.
56 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
57 S1: Wieder wie schnell sich ... das Raumschiff B bewegt.
58 B: Und wenn es wieder wirklich auf das Licht selber fokussiert?
59 S1: dann würd' ich wieder sagen, die Geschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit; Anm.) plus die Lichtge-
60 schwindigkeit.
61 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch eine Lampe auf Raumschiff A, die in Richtung Heck von Raumschiff A
62 leuchtet.
63 S1: Mhm.
64 B: Welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?
65 S1: ... die Lichtgeschwindigkeit(?)
66 B: Und das Gerät auf Raumschiff B?
67 S1: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... wie schnell Raumschiff-, äh, die Geschwindigkeit von Raumschiff A(?)
68 B: Und wieder, wenn es ... eigentlich das ... Licht fokussiert?
69 S1: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... wieder die Geschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit; Anm.) plus ...
70 die Lichtgeschwindigkeit.
71 B: Ok. Und ... tatsächliche Messungen ergeben, dass bei den Situationen mit dem Licht alle Messgeräte,
72 unabhängig von der Relativbewegung, ...
73 S1: Mhm.
74 B: ... immer exakt die Lichtgeschwindigkeit messen werden.
75 S1: Mhm.
76 B: Was sagst du dazu?
77 S1: ... dazu sagen ich (lacht) ..., na wenn sich's auf Licht... fokussiert, is es, ... kann schon sein, dass ich
78 ... mich da vertan hab' und, dass es halt ... nicht noch die Geschwindigkeit vom Raumschiff dazuzählt
79 ...
80 B: Mhm.
81 S1: ... also, wenn sich's auf's Licht fokussiert, könnte ich mir schon vorstellen, dass ich ... nur die Licht-
82 geschwindigkeit, halt, gemessen wird.
83 B: Mhm. Ah, das heißt es wär' jetzt anders als bei dem ... gehende Passagier vorhin. Das Licht würde sich
84 das anders verhalten ...
85 S1: Ja.
86 B: ... als der Passagier. Was sagst du dazu?
87 S1: ... hm, weil ... sich ... eine Person, die sich bewegt is ja was anderes wie nur so ein Lichtstrahl der
88 nur so ... ausstrahlt. Da is ja keine so ... offensichtliche Bewegung, für's menschliche Auge.
89 B: Ok. Wir betrachten jetzt zwei ... Mesgeräte auf Raumschiff A und B die exakt bestimmen, ob Er-
90 eignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Das Raumschiff A bewegt sich, relativ zu Raumschiff B, mit
91 100.000 km/s ...
92 S1: Mhm.
93 B: ... und das Gerät auf Raumschiff B misst, dass die beiden Fernseher F1 und F2 auf Raumschiff B
94 gleichzeitig eingeschaltet werden.
95 S1: Mhm.
96 B: Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A für diese Fernseher an?
97 S1: Auch, dass sie ... zur gleichen Zeit eingeschaltet werden.

98 B: Mhm ... und ..., wenn das Gerät auf Raumschiff A misst, dass die Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff
99 B gleichzeitig eingeschaltet werden, was zeigt dann das Messgerät auf Raumschiff B für diese Fernseher
100 an?

101 S1: Auch, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.

102 B: Würdest du sagen es gibt überhaupt eine Möglichkeit, dass sie (die beiden Messgeräte; Anm.) zu ver-
103 schiedenen Messergebnissen kommen?

104 S1: ... hm, ja, wenn's irgendeine ... technische Verzögerung gibt.

105 B: Mhm. Tatsächlich ergibt sich, dass ... auch ohne technische Verzögerung, oder ... Messfehler, ... die
106 beiden Geräte immer unterschiedliche Ergebnisse erhalten werden. Wenn also ein Gerät sagt etwas passiert
107 gleichzeitig, wird das andere ... auf jeden Fall sagen, dass es nicht gleichzeitig stattfindet.

108 S1: Mhm.

109 B: Was sagst du dazu?

110 S1: ... hm, vielleicht aufgrund vom Abstand ..., dass, ähm, das, halt, ... auch wenn's kein Messfehler is,
111 aber, dass halt einfach ... unterschiedlich ... ankommt vom Signal her(??)

112 B: Mhm. Tatsächlich können die Abstände eingerechnet werden und berücksichtigt werden von den Mess-
113 geräten und trotzdem kommen sie zu verschiedenen Ergebnissen.

114 S1: ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht einfach, weil's A
115 später registriert, wie B.

116 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die Längen von Objekten exakt bestim-
117 men können. Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raumschiff A, mit 100.000 km/s ... und auf Raumschiff
118 B befindet sich eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn die Länge 18,3
119 m. Welche Länge zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn an?

120 S1: 18,3 m(??)

121 B: Und was, wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet ...

122 S1: Auch 18,3 m ...

123 B: ... jetzt zeigt das Gerät auf Raumschiff A 18,3 m an, was würde dann das Gerät auf B messen?

124 S1: Auch 18,3(??)

125 B: ... und ... tatsächliche Messungen ergeben, dass immer ...

126 S1: Unterschiedlich ...

127 B: ... das Gerät das sich, relativ zur Bahn, bewegt ...

128 S1: Mhm.

129 B: ... hier (wenn sich die Bahn auf A befindet; Anm.) also das Gerät auf B und hier (wenn sich die Bahn
130 auf B befindet; Anm.) das Gerät auf A, eine kürzere Länge anzeigen wird.

131 S1: Mhm.

132 B: Was sagst du dazu?

133 S1: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht aufgrund ... der Bewegung, weil, Raumschiffe bewegen
134 sich ja ..., dass, einfach ... der eine das bisschen verkürzt wahrnimmt(??)

135 B: Mhm. Jetzt haben wir diese beiden unterschiedlichen Ergebnisse, würdest du sagen, dass es da ein rich-
136 tiges und ein falsches Ergebnis gibt?

137 S1: ... ja, auf jeden Fall ...

138 B: Mhm.

139 S1: ..., weil, wenn man die Bowlingbahn auf die Erde zurückholt und abmessen würde (lacht) ...

140 B: Mhm.

141 S1: ... dann ... hat sie ja auch ... die Länge, die sie hätte und je nachdem, welches von beiden dann ...
142 die Länge hat, wird richtig messen, aber ich vermute jetzt eher A ...

143 B: Mhm.

144 S1: ... aus dem Grund, weil's näher bei der Bowlingbahn is.

145 B: Ok. Dann gehen wir gleich in die Richtung, die du angesprochen hast und betrachten ein Raumschiff,
146 das sich, relativ zur Erde, mit 100.000 km/s bewegt, und eine Bowlingbahn auf der Erde. Auf der Erde
147 ... und auf dem Raumschiff gibt es Messgeräte die Längen exakt bestimmen, und das Gerät auf der Erde
148 zeigt für die Bowlingbahn die Länge 18,3 m an. Was zeigt dann das Gerät auf dem Raumschiff für die

149 Länge der Bowlingbahn an?
 150 S1: Ja sollte eigentlich auch 18,3 m anzeigen.
 151 B: Und auch hier ergeben tatsächliche Messungen, dass ... das, relativ zur Bahn, bewegte Gerät, also hier
 152 das Gerät auf dem Raumschiff, eine kürzere Länge anzeigen wird. Was sagst du dazu?
 153 S1: ... hm, das nimmt's einfach wieder anders wahr.
 154 B: Und was, äh, und gäb's da, jetzt einen richtigen, oder falschen Wert?
 155 S1: Ich hätt' jetzt g'sagt das auf der Erde ist das richtige.
 156 B: Ok.

Interview 2:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B und du befindest dich auf Raumschiff A.
 2 S2: Ja.
 3 B: Du siehst, dass sich Raumschiff B, relativ zum Raumschiff A, bewegt.
 4 S2: Ja.
 5 B: Hast du eine Möglichkeit festzustellen, ob sich wirklich Raumschiff B bewegt, oder vielleicht doch Raum-
 6 schiff A, oder sogar beide?
 7 S2: ... äh, für mich, bewegt sich eben Raumschiff B ...
 8 B: Ja.
 9 S2: ... weil eben ... ich das ruhen-, mein Bezugssystem bin ...
 10 B: Mhm.
 11 S2: ... ich glaube ich hab kein, hab keine Möglichkeit festzustellen, wer sich bew-, wirklich ... wirklich
 12 bewegt.
 13 B: Und gäbe es eine Möglichkeit von außen irgendwie draufzuschauen, jetzt nicht für dich, aber ... generell
 14 für einen Beobachter von außen, so etwas festzustellen?
 15 S2: Ja, äh, er, er kann es nicht feststellen, ob er sich bewegt, oder das Raumschiff sich bewegt ...
 16 B: Mhm.
 17 S2: ... aber er kann ... feststellen, ob sich ... beide jetzt, ... ob sich bewegt, ob sich jetzt eines ... im
 18 Bezugssystem zu ihm bewegt, oder ob sich er ganz bewegt, oder ...
 19 B: Mhm.
 20 S2: ... jetzt beide bew-, bewegen.
 21 B: Ok. Für uns ist aber jedenfalls nur relevant ... einer bewegt sich, wer ist ja egal. Jetzt betrachten wir
 22 in beiden Raumschiffen Messgeräte die Geschwindigkeiten von Objekten, oder Personen exakt bestimmen
 23 können. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s.
 24 S2: Ja.
 25 B: Auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit wird das Messgerät auf Raumschiff B für
 26 diesen Passagier messen?
 27 S2: Für den Passagier ... misst es ... die 100.000 km/s.
 28 B: Die Messgeräte messen immer die Relativgeschwindigkeit von dem Objekt das sie messen, in dem Fall
 29 der Passagier, zum Messgerät selbst.
 30 S2: Ah so, dann misst er (das Gerät auf Raumschiff B; Anm.) gar keine Geschwindigkeit, ah so, weil das
 31 ... Messgerät hat ja auch eine Geschwindigkeit so, also ja auch, bewegt ja auch nochmals, ja.
 32 B: Mhm. Und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier messen?
 33 S2: ... ja das wird dann die 100.000 km/s messen.
 34 B: Ok. Der Passagier steht auf und geht ... ganz gemütlich in Richtung Spitze von Raumschiff B.
 35 S2: Ja.
 36 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?
 37 S2: Die Geschwindigkeit mit der er geht, ohne der ..., äh, Raketengeschwindigkeit.
 38 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
 39 S2: ... ähm, die Geschwindigkeit der Rakete plus ... seine Gehgeschwindigkeit.
 40 B: Ok. Der Passagier wird durch eine Lampe ersetzt die ... auf Raumschiff B platziert ist und in Richtung
 41 Spitze von Raumschiff B leuchtet.

42 S2: Ja.

43 B: Die Lichtgeschwindigkeit beträgt 300.000 km/s ... ungefähr. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät

44 auf Raumschiff B für das Licht?

45 S2: ... die Lichtgeschwindigkeit.

46 B: Und das auf Raumschiff A, was misst das für das Licht?

47 S2: Müsste auch die Lichtgeschwindigkeit sein.

48 B: Und was, wenn wir die Lampe auf Raumschiff A aufstellen und sie leuchtet in Richtung Heck auf Raum-

49 schiff A? Was misst dann das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?

50 S2: Auch die Lichtgeschwindigkeit.

51 B: Und das Gerät auf Raumschiff B?

52 S2: Das bewegt sich in dieselbe Richtung wie das Licht.

53 B: Mhm.

54 S2: Ich würd' sagen trotzdem Lichtgeschwindigkeit.

55 B: Du würdest also sagen, dass die Lichtgeschwindigkeit keinen Einfluss darauf hat wie die ... wie schnell

56 das Licht gemessen wird ...

57 S2: Hm, ja.

58 B: ... und warum wäre das so?

59 S2: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... weil si-, weil sich, weil die Lichtgeschwindigkeit nie ändert, weil sie

60 immer gleich is. ... wenn ich zum Beisp-, wenn wir eben das Beispiel von ... von vorhin haben, wenn er,

61 wenn der Mensch geht add-, addieren sich die Geschwindigkeiten, das Licht bleibt das ... Lichtgeschwin-

62 digkeit bleibt Lichtgeschwindigkeit.

63 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf Raumschiff A und B Messgeräte die exakt bestimmen, ob zwei Ereignisse

64 gleichzeitig stattfinden, oder nicht. ... das, äh, Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B mit

65 100.000 km/s.

66 S2: Ja.

67 B: Auf Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2 und das Gerät auf Raumschiff B misst, dass F1

68 und F2 gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?

69 S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... es wird messen, dass es, sie nicht gleichzeitig eingeschaltet werden.

70 B: Und warum wäre das so?

71 S2: ... weil es (Raumschiff A; Anm.) sich ja wegbewegt und somit der eine Bildschirm näher zum Raum-

72 schiff is als der andere Bildschirm.

73 B: Und wenn die Messgeräte die Abstände mitberücksichtigen und einrechnen ... und über einen Zeitraum

74 die Daten sammeln und dann auswerten, was wäre dann?

75 S2: dann müsste es (das Gerät auf Raumschiff A; Anm.) gleichzeitig messen.

76 B: Ok. Noch zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B. Diesmal misst das Gerät auf Raumschiff A,

77 dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.

78 S2: Ja.

79 B: Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B an?

80 S2: Na, jetzt ... wird's, es ... Gerät auf Raumschiff B messen, dass sie ungl-, nicht gleichzeitig eingeschaltet

81 werden.

82 B: Und wenn die Abstände wieder berücksichtigt werden?

83 S2: Dann wird's wieder messen, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.

84 B: Ok. Jetzt hat sich gezeigt in der Forschung, dass selbst wenn die Geräte perfekt berücksichtigen welche

85 Abstände im Spiel sind, trotzdem dieses Gerät auf Raumschiff B messen würde, dass sie (F1 und F2; Anm.)

86 nicht gleichzeitig eingeschaltet würden ...

87 S2: Ok ...

88 B: ... was sagst du dazu?

89 S2: ... ziemlich verwunderlich, weil, es geht ja, ich dachte es geht ja eigentlich um die Abstände, die jetzt

90 das Problem sind, aber ... scheinbar doch nicht.

91 B: Mhm ... ok. Jetzt haben wir auf Raumschiff A und Raumschiff B Messgeräte, die Längen von Objekten

92 exakt bestimmen können. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s ...

93 S2: Ja.
 94 B: ... und auf Raumschiff B befindet sich eine Bowlingbahn.
 95 S2: Ja.
 96 B: Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Welche Länge zeigt das
 97 Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn an?
 98 S2: Es werden auf jeden Fall keine 18,3 m sein. Hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich würd' fast sagen,
 99 sie zeigt einen lä-, sie zeigt ... längere Strecke an.
 100 B: Und wie würde es dazu kommen?
 101 S2: Weil der ... Raumschiff B bewegt sich ... weg von Raumschiff A ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ...
 102 somit wird vielleicht irgendwie die Geschwindigkeit dazugerechnet, vom Gerät ... oder es zieht's einfach
 103 irgendwie in die Länge, weil das ... sich wegbewegt(??)
 104 B: ... ok. Was wäre, wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet? Jetzt zeigt das gerät auf
 105 Raumschiff A für diese Bahn eine Länge von 18,3 m an. Was würde dann das Gerät auf Raumschiff B für
 106 die Länge der Bowlingbahn anzeigen?
 107 S2: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... (lacht) es werden wieder nicht die 18,3 m sein ... (7 Sekunden
 108 Pause; Anm.) ... bin nicht so sicher, ich würd' fast sagen ... kürz-, eine ... kürzere Länge.
 109 B: Und wie würde es dazu kommen?
 110 S2: Weil, irgendwie, indem es (das Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) irgendwie vorbeifliegt ... staucht
 111 die Mess-, das vorbeifliegende Mess- ... staucht das vorbeifliegende Messgeräts die Länge irgendwie ein?
 112 B: Mhm, und ... wenn Messgeräte solche Effekte berücksichtigen könnten, was wäre dann?
 113 S2: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich hätt', hätt' jetzt gesagt, dass es eben ... dann wieder die 18,3 m
 114 anzeigt, mit dem vor-, mit dem vorigen Beispiel mit den ... Bildschirmen werden's aber trotzdem keine
 115 18,3 m sein.
 116 B: Hm. Tatsächlich zeigt sich, dass ... immer das Gerät, das sich relativ zur Bahn bewegt ...
 117 S2: Ja.
 118 B: ... also hier (wenn sich die Bahn auf B befindet; Anm.) wäre das das Gerät auf Raumschiff A ...
 119 S2: Ja.
 120 B: ... und hier (wenn sich die Bahn auf A befindet; Anm.) das Gerät auf Raumschiff B ... das zeigt immer
 121 eine kürzere Länge an.
 122 S2: Ok.
 123 B: Bei Berücksichtigung von Abständen und solchen Effekten. Was sagst du dazu?
 124 S2: ... es ist halt ... allgemein ziemlich lustig, weil für uns ist die Bahn halt einfach 18,3 m lang.
 125 B: Mhm.
 126 S2: ... und, dass da jetzt immer einfach was Kürzeres anzeigt ...
 127 B: Mhm.
 128 S2: ... halt, komisch, auch wenn's das andere noch, noch berücksichtigt.
 129 B: Ja. Würdest du sagen es gibt da einen richtigen und einen falschen Wert?
 130 S2: Nein, weil für jeden ist ... der eigene Wert der richtige.
 131 B: Mhm, welche ... Länge hat denn die Bowlingbahn tatsächlich?
 132 S2: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ich würde sagen 18,3 m, aber für ... jetzt zum Beispiel, in dem
 133 Beispiel für Raumschiff B hat's tatsächlich weniger.
 134 B: Ok, also meinst du es gibt keinen ... einen absoluten Wert?
 135 S2: ... ich würd' jetzt mal sagen 18,3 m, weil absoluter Wert müsste auch der sein, ... wenn man daneben
 136 steht und ...
 137 B: Mhm.
 138 S2: ... es ist ...
 139 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch ... Messgeräte die längen exakt bestimmen auf der Erde und auf einem
 140 ... mit 100.000 km/s vorbeifliegenden Raumschiff. Auf der Erde befindet sich eine Bowlingbahn und das
 141 Gerät auf der Erde misst für diese eine Länge von 18,3 m. Welchen Wert misst dann das Gerät auf dem
 142 Raumschiff?
 143 S2: ... wahrscheinlich wieder eine kürzere, weil sich, also weil's ... sich das Raumschiff relativ zur Bow-

144 lingbahn bewegt.
145 B: und gäbe es hier einen ... absoluten, oder einen richtigen, oder einen falschen Wert?
146 S2: Nein. Also wir würden wieder den Wert auf der Erde als richtiger ansehen, aber es gibt keinen richtigen.
147 B: Ok, danke.

Interview 3:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B und du befindest dich in Raumschiff A. Du siehst, dass
2 Raumschiff B sich, relativ zu Raumschiff A, bewegt. Hast du eine Möglichkeit festzustellen, ob sich wirk-
3 lich Raumschiff B bewegt, oder vielleicht doch Raumschiff A, oder vielleicht sogar beide?
4 S3: Ich glaub' man kann's halt messen, indem man ... halt eine Lichtuhr verwendet, weil anders kann
5 man's glaub' ich nicht feststellen ...
6 B: Mhm.
7 S3: ..., weil, aus der Sicht von A kann sich B bewegen, aber aus der Sicht von B kann sich auch A bewegen.
8 B: Mhm.
9 S3: Das weiß man halt nicht, wenn man ... misst, bzw. ich glaub' wenn man misst ..., dann kann man's
10 auch nicht wirklich wissen, weil ... jeder aus seiner Sicht recht hat.
11 B: Mhm. Und gäb's irgendwie eine ... Sicht von draußen, die das absolut feststellen könnte?
12 S3: ... hm, ich denk' schon, wenn's einen ruhenden Körper gibt, der von außen die Schiffe betrachtet und
13 dann ... Zeit misst, ich glaub' dann geht das.
14 B: Ok. Jedenfalls ... in der Situation, in der wir uns befinden, auf einem der Raumschiffe, können wir's
15 nicht sagen, deshalb ist auch ... gar nicht wichtig wer sich bewegt, sondern ... nur ... wie groß die Relativ-
16 geschwindigkeit ist. Jetzt befinden sich auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die Geschwindigkeiten exakt
17 bestimmen können. Dabei bestimmen sie immer die Relativgeschwindigkeit des Objekts das sie messen
18 relativ zum Messgerät. Also, entfernt sich das vom Messgerät, oder bewegt sich das auf das Messgerät zu
19 und wie schnellgeht das, das messen sie. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000
20 km/s ... und auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff
21 B für den sitzenden Passagier?
22 S3: Diese 100.000 ... Kilometer pro ... Stunde, oder wie viel war's?
23 B: Mhm.
24 S3: Ja.
25 B: Also würdest du sagen der ... Passagier entfernt sich mit ... einer Geschwindigkeit von 100.000 km/s
26 von diesem Messgerät?
27 S3: Nein mit dem Messgerät, er entfernt sich glaub' ich (lacht) ... nein, ich glaub' er entfernt sich mit der
28 Geschwindigkeit von dem (Messgerät; Anm.) hier (auf Raumschiff A; Anm.).
29 B: (unverständlich) das heißt dieses Objekt, äh, dieses Messgerät auf Raumschiff A ... würde was anzeigen
30 für den Passagier?
31 S3: Diese Geschwindigkeit, von vorhin.(?)
32 B: Und das auf Raumschiff B, was würde das dann anzeigen für den Passagier? ... der sich ja im gleichen
33 Raumschiff befindet.(?)
34 S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht eine schnellere? Ich glaub' er (das Gerät auf Raumschiff
35 B; Anm.) ... würde drinnen eine schnellere Geschwindigkeit messen (unverständlich).
36 B: Das heißt, der Passagier entfernt sich von diesem Messgerät auf Raumschiff B noch schneller, als von
37 dem auf Raumschiff A?
38 S3: Na, er (der Passagier; Anm.) bewegt sich gar nicht, weil, er sitzt da drin, aber ...
39 B: Das heißt, wie schnell entfernt er (der Passagier; Anm.) sich von dem Messgerät hier (auf Raumschiff
40 B; Anm.)?
41 S3: ... ja, gar nicht.
42 B: Gar nicht, ja, was zeigt dann das Gerät dann einfach an als Geschwindigkeit?
43 S3: Null.
44 B: Null, genau so ist es, ja. Und wenn er (der Passagier; Anm.) jetzt aufsteht ... und gemütlich in Richtung
45 Spitze von Raumschiff ... B geht, was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B für ihn an?

46 S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... seine Geschwindigkeit mit der er zum ... zum vorenen, vorderen
47 Teil geht.

48 B: Und was würde das Gerät auf Raumschiff A für die Geschwindigkeit des Passagiers anzeigen?

49 S3: ... seine Geschwindigkeit und die Geschwindigkeit mit der sich das Raumschiff bewegt.

50 B: Mhm. Jetzt ersetzen wir den Passagier durch eine Lampe, auf Raumschiff B, die in Richtung Spitze von
51 Raumschiff B leuchtet. Licht bewegt sich mit 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit zeigt das Gerät auf
52 Raumschiff B für das Licht an?

53 S3: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' die Lichtgeschwindigkeit(.?)

54 B: Und das auf Raumschiff A?

55 S3: Auch Lichtgeschwindigkeit.

56 B: Und was, wenn die Lampe auf Raumschiff A platziert wäre und in Richtung Heck von Raumschiff A
57 leuchtet. Was zeigt dann das Gerät ... auf Raumschiff A an ... für das Licht?

58 S3: ... ja, auch Lichtgeschwindigkeit.

59 B: Und das auf Raumschiff B?

60 S3: Lichtgeschwindigkeit(.) (lacht)

61 B: Also würdest du sagen ..., dass ... die ... Relativgeschwindigkeit zwischen Messgerät und Lichtquelle
62 ... keinen Einfluss auf die Messung der Lichtgeschwindigkeit hat?

63 S3: Ich glaub' nicht, weil, also, die Lichtgeschwindigkeit bleibt doch immer gleich, oder?

64 B: Ok. Jetzt betrachten wir zwei ... Messgeräte, auf beiden Raumschiffen, ... Die exakt bestimmen,
65 ob Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Raumschiff A bewegt sich, relativ zu Raumschiff B mit
66 100.000 km/s. Auf Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2. Das Gerät auf Raumschiff B misst,
67 dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?

68 S3: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' nicht, dass Raumschiff A zeigt, dass sie gleichzeitig ein-
69 geschaltet werden. Ich glaub' das kann halt nur dieses Messgerät (auf Raumschiff B; Anm.) machen.

70 B: Was wäre da die Ursache dafür?

71 S3: Weil sich das ... Raumschiff bewegt?

72 B: Mhm.

73 S3: ... und ich glaub' das kann nur ein ruhender Betrachter halt machen, es ... eine Gleichzeitigkeit
74 messen ...

75 B: Mhm. Ok.

76 S3: ... und in der Mitte von ... den zwei Bildschirmen.

77 B: Wir können ja so tun als werden, würden die in der Mitte stehen. Wir können ja auch das (Gerät auf
78 Raumschiff A; Anm.) so hinstellen, dass die (Fernseher F1 und F2; Anm.) gleich weit entfernt sind. Was
79 würde es dann anzeigen? Gleichzeitig, oder nicht gleichzeitig?

80 S3: Hm, trotzdem nicht gleichzeitig weil's so, sich vorbeibewegt.

81 B: Ok. ... und jetzt ... misst das Gerät auf Raumschiff A, dass ... die beiden Fernseher F3 und F4
82 gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B an?

83 S3: ... das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) misst, dass ... die (Fernseher F3 und F4; Anm.) gleichzeitig
84 eingeschaltet werden?

85 B: Mhm.

86 S3: ... (13 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht ... ich weiß es
87 nicht. (lacht) ... hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) misst, dass
88 sie gleichzeitig ... sind, aber das würde jetzt nicht ...

89 B: Was würde das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) dann anzeigen?

90 S3: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass sie sich ... nicht gleichzeitig einschalten, oder ... (seufzt)

91 B: Du hättest in beiden Fällen jetzt gesagt, dass, wenn ein Gerät sagt, „gleichzeitig“, das andere sagen
92 würde „nicht gleichzeitig“ und gemeint, die Bewegung wäre da die Ursache ...

93 S3: Ja.

94 B: Was würde denn die Bewegung da bewirken ... damit dieser Unterschied zustande kommt?

95 S3: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, ... wenn es sich bewegt, dann ... entsteht halt eine Relativ-
96 geschwindigkeit(.?)

97 B: Mhm.
 98 S3: und (lacht), das is voll kompliziert ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... na weil, ah ja, wenn sich das
 99 eine halt weiterbewegt ...
 100 B: Mhm.
 101 S3: Dann sieht's so aus, ... wenn man jetzt zum Beispiel ... einen Betrachter hat und der steht hier (wo
 102 sich das Messgerät auf B befindet; Anm.) und nicht in der Mitte, dann sieht's so aus, als würde das eine
 103 Ereignis später stattfinden als das andere, obwohl sie von der Sicht (des Geräts auf Raumschiff A; Anm.)
 104 gleichzeitig ... stattfinden würden, aber ...
 105 B: Ok, also du ... meinst, dass es um den Abstand gehen würde ... und wie lange das Licht dann braucht
 106 zum Messgerät zu kommen.
 107 S3: ... Ja, also ist das ... ein Licht, oder ist das (unverständlich) ...
 108 B: Naja, wenn die Fernseher sich einschalten, dann ... kann man das Licht davon ja ...
 109 S3: Naja, weil, wenn das Licht ... äh, von einem ... also ins Raumschiff eindringt ...
 110 B: Mhm.
 111 S3: ... und dann ... gleichzeitig nach vorne und zurück, dann sollten sie gleichzeitig angehen.
 112 B: Mhm.
 113 S3: Aber wenn das andere Raumschiff sich bewegt und das Licht strahlt rein, dann kommt's zuerst hinten
 114 an und dann vorne, deshalb würden die Fernseher halt unterschiedlich ...
 115 B: Ok.
 116 S3: ... zu unterschiedlichen Zeiten angehen.
 117 B: Und wenn das Messgerät das berücksichtigen würde und die Daten über einen Zeitraum hinweg sammelt
 118 und dann auswertet und dabei berücksichtigt wo sich was befindet zu welchem Zeitpunkt ... was würd's
 119 dann anzeigen?
 120 S3: ... dann zeigt es ... auch eigentlich an zumindest, dass sich das ... also, dass das Raumschiff sich
 121 bewegt, oder?
 122 B: Ja, ob die (Fernseher F3 und F4; Anm.) gleichzeitig eingeschaltet werden, oder nicht is immer die Fra-
 123 ge.
 124 S3: Ja und wenn sie gleichzeitig eingeschalten sind dann ... bewegt es sich ... nicht, oder? Wenn die
 125 Lichtquelle in der Mitte is ...
 126 B: Mhm, ... also wenn wir sagen, die Messgeräte berücksichtigen Abstände, das kann man ja einrechnen,
 127 das geht prinzipiell ... oder wir stellen sie einfach in die Mitte, das kann man auch machen ... dann sagt
 128 dieses Gerät auf Raumschiff A, F3 und F4 werden gleichzeitig eingeschaltet. Jetzt berücksichtigt dieses
 129 Messgerät hier (auf Raumschiff B; Anm.) auch die Abstände. Was würde es dann sagen? Auch, dass F3
 130 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden, oder ... würde es trotzdem sagen „nicht gleichzeitig“?
 131 S3: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' dann, dann würde es sagen, dass sie gleichzeitig einge-
 132 schaltet sind ...
 133 B: Mhm.
 134 S3: ... wenn ich, also dieses Messgerät hier.
 135 B: Mhm. Das Überraschende an dieser Situation ist, selbst wenn die Abstände und Lichtlaufzeiten berücksichtigt
 136 werden, ... werden, wird dieses Gerät (auf Raumschiff B; Anm.) trotzdem sagen, dass sie (die Fernseher
 137 F3 und F4; Anm.) nicht gleichzeitig eingeschaltet werden. Was sagst du dazu?
 138 S3: (lacht) ja, wie geht das? (lacht) ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... wenn das anzeigt, dass diese ...
 139 gleichzeitig ... angehen und das zeigt aber nicht an, obwohl's eh auf dem Raumschiff is ...
 140 B: Mhm. Und genauso auch in der Situation, wenn das Gerät hier (auf Raumschiff B; Anm.) anzeigt F1
 141 und F2 werden gleichzeitig eingeschaltet, dann würde das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) auf keinen Fall
 142 anzeigen, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.
 143 S3: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... da bin ich raus. (lacht)
 144 B: Ok. (lacht) Würdest du sagen, das is überraschend?
 145 S3: Ja, es is überraschend, aber, ... es is ...
 146 B: Mhm. Jetzt betrachten wir noch auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Längen von Objekten exakt
 147 bestimmen können. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s ... und auf

148 Raumschiff B befindet sich eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn die
 149 Länge 18,3 m. Welche Länge zeigt das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn an?
 150 S3: ... eine, eine verkürzte Länge.(?)
 151 B: Mhm, und wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet, dann zeigt das Gerät auf Raumschiff
 152 A für diese eine Länge von 18,3 m an. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B für die Länge der Bahn
 153 an?
 154 S3: ... und das (Raumschiff B; Anm.) ist jetzt das bewegende? ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub'
 155 auch eine verkürzte.
 156 B: Ok. Wie würdest du sagen, warum ... kommt's zu dieser Verkürzung?
 157 S3: Naja, weil, also, das (Raumschiff B; Anm.) bewegt sich halt mit einer Geschwindigkeit und somit,
 158 wenn's ... hier anfängt zu messen, aber sich so schnell bewegt, dass es ... diese Bahn sich dann ...
 159 verkürzt und der andere Messpunkt ... zum Beispiel hier wäre, oder so.(?)
 160 B: Mhm.
 161 S3: Und das ist dann einfach ... die Länge verkürzt aufgrund der Geschwindigkeit von ... B.
 162 B: Ok. Würdest du sagen, dass einer der Werte richtig und einer falsch ist?
 163 S3: ... hm, naja, es kommt drauf an, was ... man ... Auge vom Betrachter, also wenn man auf B ist,
 164 dann denkt B es ist die richtige Messung und wenn man auf A ist dann ... denkt man A hat die richtige
 165 Messung durchgeführt.
 166 B: Und ... gäb's ... ein objektiv richtigen Wert für die Länge der Bahn?
 167 S3: ... hm ... ich glaube nicht. (lacht)
 168 B: Also, du würdest sagen sie haben verschiedene Ergebnisse, aber beide sind richtig?
 169 S3: Aus der Sicht von ... A, oder B, je nachdem wer es gemessen hat, sind sie richtig, aber generell kann
 170 man jetzt nicht sagen, wer richtig ist, nur aus der Sicht von ... A, oder B, glaub' ich.
 171 B: Mhm.
 172 S3: Keine Ahnung. (lacht)
 173 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch ein Raumschiff, dass sich mit 100.000 km/s an der Erde vorbeibewegt
 174 und auf dem Raumschiff und auf der Erde gibt es wieder Messgeräte, die Längen exakt bestimmen. Auf
 175 der Erde befindet sich eine Bowlingbahn ... und das Messgerät auf der Erde misst für die Bowlingbahn
 176 die Länge 18,3 m. Welche Länge zeigt dann das Gerät auf dem Raumschiff für die Bowlingbahn an?
 177 S3: ... ich glaub' eine verkürzte, hm ...
 178 B: Und würde es hier einen richtigen und einen falschen Wert geben?
 179 S3: Nein, ... weil, auch wenn, also das Raumschiff bewegt sich ja mit ... einer schnelleren Geschwindigkeit,
 180 aber ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... trotzdem stimmt der Wert, den sie gemessen haben, weil ... wenn
 181 die Bahn kürzer ist und sie ... bewegen sich aber auch schnell, dann sind sie schneller wieder am Ziel, also
 182 (lacht) ...
 183 B: Mhm.
 184 S3: ... sind ... jeder hat ... aus seiner Sicht recht, würd' ich sagen.
 185 B: Ok. Danke.

Interview 4:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B und du befindest dich auf Raumschiff A.
 2 S4: Mhm.
 3 B: Du siehst, dass sich Raumschiff B, relativ zu dir bewegt. Kannst du irgendwie feststellen, ob sich wirk-
 4 lich B bewegt, oder vielleicht doch A, oder sogar beide?
 5 S4: Nein.
 6 B: Würdest du sagen es gibt irgendeine Möglichkeit von außen auf die Situation zu schauen und das zu
 7 entscheiden?
 8 S4: Ja. Weil ich in einem ... anderen, äh, Bezugssystem bin.
 9 B: Mhm.
 10 S4: Und deswegen ..., ich wäre das ruhende System und kann dann sagen ... wer si-, obwohl nein! ... (9
 11 Sekunden Pause; Anm.) ... also, zwischen denen kann ich die Bewegung sagen, ja, als Außenstehender.

12 B: Mhm. Und könnte dann jemand von denen Einspruch erheben und sagen, nein, aus meiner Sicht bewegst
13 dich aber du als Außenstehender?
14 S4: Ja. Es würde für ihr Bezugssystem stimmen.
15 B: Ok, also ... gäb's jetzt eine absolute Entscheidungsmöglichkeit?
16 S4: Nein.
17 B: Gut. In solchen Situationen brauchen wir nur die Relativgeschwindigkeit. Jetzt betrachten wir auf beiden
18 Raumschiffen Messgeräte die ... Geschwindigkeiten exakt bestimmen. Dabei beschwin-, bestimmen sie
19 immer die ... Relativgeschwindigkeit zwischen sich selbst und dem, was sie messen.
20 S4: Mhm.
21 B: Also, ob sich was auf's Messgerät zubewegt, oder nicht. Das Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raum-
22 schiff A, mit 100.000 km/s ... und auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst
23 das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?
24 S4: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... relativ zu A?
25 B: Nur das Gerät auf B misst ... die Geschwindigkeit des Passagiers.
26 S4: Hundert, äh, Meter pro Sekunde.
27 B: Was würde das Gerät auf A für den Passagier messen?
28 S4: ... einen anderen Wert?
29 B: Es geht immer um die Frage, wie ... schnell bewegt sich der Passagier auf das Messgerät zu, oder von
30 dem Messgerät weg.
31 S4: Also, ein ... höheren Wert.
32 B: Schau dir die Situation einmal genau an. ... ähm, stell dir vor das is jetzt kein Messgerät, sondern du
33 bist es und du sitzt da auch.
34 S4: Mhm.
35 B: Wie schnell entfernt sich der (Passagier auf Raumschiff B; Anm.) dann von dir?
36 S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... der Passagier?
37 B: Mhm. Es geht immer um den Passagier.
38 S4: Mit ... Null.
39 B: Mhm. Was würde dann das Messgerät für ihn messen?
40 S4: Null.
41 B: Und was würde das Messgerät auf Raumschiff A für ihn messen?
42 S4: 100.000, so.
43 B: Jetzt' sind wir drin.
44 S4: Ja.
45 B: (lacht) der Passagier steht auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B.
46 S4: Mhm.
47 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?
48 S4: So ... schnell wie er geht.
49 B: Und das auf Raumschiff A?
50 S4: Ähm, die ... 100.000 plus das, was er geht.
51 B: Jetzt ersetzen wir den Passagier durch eine Lampe ... auf Raumschiff B, die in Richtung Spitze von
52 Raumschiff B leuchtet.
53 S4: Mhm.
54 B: Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff
55 B für das Licht?
56 S4: Die Lichtgeschwindigkeit(?.)
57 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
58 S4: Auch die Lichtgeschwindigkeit.
59 B: Und was, wenn wir die ... Lampe auf Raumschiff A platzieren und sie in Richtung Heck von A leuchtet?
60 Was messen die beiden Geräte dann?
61 S4: Auch die Lichtgeschwindigkeit(?.)
62 B: Beide, auch das auf Raumschiff B?

63 S4: Beide.

64 B: Du würdest also sagen, dass die ... Relativgeschwindigkeit gar keinen Einfluss auf die Messung der

65 Lichtgeschwindigkeit hat. Warum ...

66 S4: Ja.

67 B: ... wäre das so?

68 S4: Weil ... die Lichtgeschwindigkeit konstant ist ... und ... es nicht ... schneller geht, als die Lichtge-

69 schwindigkeit(??)

70 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die exakt bestimmen können, ob Ereig-

71 nisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht.

72 S4: Mhm.

73 B: Auf Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2 und Raumschiff A bewegt sich, relativ zu Raum-

74 schiff B, mit 100.000 km/s. Das Gerät auf Raumschiff B misst, dass F1 und F2 gleichzeitig eingeschaltet

75 werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?

76 S4: Ähm, nicht gleichzeitig.

77 B: Und warum wäre das so?

78 S4: Ähm, weil ... der Weg ein anderer ist. Heißt, sie würden sagen, dass ... F1 vor F2 ...

79 B: Mhm.

80 S4: ... eingeschaltet wird.

81 B: Und was, wenn die Messgeräte den Weg berücksichtigen und einrechnen würden?

82 S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... heißt, sozusagen, dass F2 kurz davor ... eingeschaltet wird.

83 B: Beide Geräte berücksichtigen jeweils die Abstände ...

84 S4: Mhm.

85 B: ... zu den Fernsehern. Das Gerät auf B zeigt an, die sind gleichzeitig eingeschaltet worden.

86 S4: Mhm.

87 B: Was würde dann das Gerät auf Raumschiff A anzeigen?

88 S4: ... noch immer nicht gleichzeitig.

89 B: Und warum?

90 S4: ... weil A in einem andern Bezugssystem ist.

91 B: Und das bedeutet?

92 S4: Das, was für B gleichzeitig ist, ... kann nicht für A gleichzeitig sein.

93 B: Ok. Wir betrachten noch zwei Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff B ... und diesmal ... misst das

94 Gerät auf Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raum-

95 schiff B an?

96 S4: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschaltet werden ... wieder, dasselbe, mit andern Bezugssystemen.

97 B: Ok. Und ... welche ... der beiden Aussagen würde jetzt stimmen? Dass sie gleichzeitig eingeschaltet

98 wurden, oder, dass sie nicht gleichzeitig eingeschaltet wurden?

99 S4: Beides stimmt für das jeweilige Bezugssystem, ... es kommt drauf an wie man's sieht.

100 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen ... Messgeräte, die Längen exakt bestimmen können.

101 Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raumschiff A, mit 100.000 km/s und auf Raumschiff B befindet sich

102 eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B ... misst für die Bowlingbahn die Länge 18,3 m. Welche

103 Länge zeigt das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn an?

104 S4: Eine längere ... Länge(??) Das war das mit diesen Längen ... kontrak-, ich weiß jetzt nicht wie der

105 Fachbegriff heißt, aber ... der ... sagt etwas Anderes auf jeden Fall.

106 B: Mhm, und, also, du hast gemeint etwas Längeres, ...

107 S4: Mhm.

108 B: ... würde er anzeigen. Was, wenn sich die Bowlingbahn ... auf Raumschiff A befindet? Das Gerät

109 auf Raumschiff A misst für die Bowlingbahn die Länge 18,3 m. Welche Länge zeigt dann das Gerät auf

110 Raumschiff B für die Bowlingbahn an?

111 S4: Eine ... kürzere? Also, auf jeden Fall wieder eine andere, ja.

112 B: Mhm, ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass immer das Gerät, das sich relativ zur Bahn bewegt

113 eine kürzere Länge anzeigt als das Gerät, das, relativ zur Bahn, ruht.

114 S4: Mhm.
 115 B: Das heißt hier (wenn sich die Bahn auf B befindet; Anm.) würde das Gerät auf A etwas Kürzeres als
 116 ...
 117 S4: Also, ...
 118 B: ... 18,3 anzeigen und hier (wenn sich die Bahn auf A befindet) würde das Gerät auf B ...
 119 S4: ... etwas Längeres.
 120 B: ... etwas Kürzeres ... als 18, 3 anzeigen.
 121 S4: Mhm.
 122 B: Was sagst du dazu?
 123 S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... is halt so. (lacht)
 124 B: Und ... bei diesen verschiedenen Werten, welcher, äh, ... gäbe es da jetzt einen richtigen und einen
 125 falschen Wert?
 126 S4: Nein. Wieder ... kommt drauf an aus welchem Bezugssystem man's sieht.
 127 B: Und, welche Länge hat dann die Bowlingbahn?
 128 S4: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... kommt auch auf's Bezugssystem an, weil man's ... eigentlich nicht
 129 genau sagen kann.
 130 B: Ok. Äh, wenn du meinst „nicht genau sagen kann“, meinst du, es gibt prinzipiell einen ... absoluten
 131 Wert, den wir aber nicht feststellen können?
 132 S4: Es gibt keinen absoluten Wert.
 133 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch ein Raumschiff, das sich mit 100.000 km/s an der Erde vorbeibewegt.
 134 S4: Mhm.
 135 B: Auf ... der Erde und auf dem Raumschiff gibt es Messgeräte die Längen exakt bestimmen können ...
 136 und auf der Erde gibt es eine Bowlingbahn. Das Gerät auf der Erde misst für die Bowlingbahn die Länge
 137 18,3 m. Welche Länge zeigt dann das Gerät auf dem Raumschiff für die Bowlingbahn an?
 138 S4: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, wieder ... eine andere? Eine kürzere?
 139 B: Und ... wieso kommt's dazu?
 140 S4: ... ähm, ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... weil ... sich das Raumschiff mit ... einer sehr sehr hohen
 141 Geschwindigkeit fortbewegt und es deswegen aus ihrem Bezugssystem ... eben die Bahn kürzer einfach
 142 gemessen wird.
 143 B: Mhm. Und ... gäbe es hier einen richtigen und einen falschen Wert?
 144 S4: Nein, es kommt auch wieder auf's Bezugssystem ... drauf an.
 145 B: Ok. Also würdes-, äh, gibt's ..., kannst du hier sagen ... es gibt, auch theoretisch vielleicht eine ...
 146 absolute Länge, die die Bahn hat?
 147 S4: ... für jedes einzelne Bezugssystem schon, aber generell nicht.
 148 B: Ok.

Interview 5:

1 B: Wir betrachten eine Situation, in der wir zwei Raumschiffe A und B sehen. Du befindest auf Raumschiff
 2 A und siehst, dass sich Raumschiff B relativ zu dir bewegt. Hast du eine Möglichkeit festzustellen, ob sich
 3 jetzt wirklich Raumschiff B bewegt, oder vielleicht doch Raumschiff A, oder sogar beide?
 4 S5: Äh, nein. Weil es kein weiteres Bezugssystem gibt, dass ... stehend ist, also außer ich geh davon aus,
 5 dass ich stehend bin, aber ... feststellen kann ich's nicht.
 6 B: Mhm. Aber würdest du sagen prinzipiell wär's möglich, dass es ein feststehendes Bezugssystem gibt,
 7 von dem aus man das feststellen könnte?
 8 S5: Ähm ... rein theoretisch ja, für die zwei Objekte halt dann.
 9 B: Mhm, ok. Aber jetzt eben, nachdem wir es jetzt nicht feststellen können, nur die Relativbewegung
 10 relevant.
 11 S5: Ja.
 12 B: Gut. Auf Raumschiff A und B befinden sich Messgeräte, ... mit denen Geschwindigkeiten von Objekten,
 13 oder Personen exakt gemessen werden können ... und zwar immer die Relativgeschwindigkeit des Objekts
 14 zum Messgerät.

15 S5: Mhm.

16 B: Auf Raumschiff B, ah, Raumschiff B bewegt sich mit 100.000 km/s relativ zu Raumschiff A und auf
17 Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den sit-
18 zenden Passagier?

19 S5: Ähm ... also das Messgerät misst vom Raumschiff ... wo es drin ist die Geschwindigkeit?

20 B: Das ... befindet sich im Raumschiff B und will wissen, wie schnell bewegt sich der Passagier relativ
21 zum Messgerät.

22 S5: Ähm, dann würd's gar nichts anzeigen, weil sie ... dieselbe Geschwindigkeit haben, was in dem Fall
23 dann für das Messgerät 0 wär'.

24 B: Mhm, und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier anzeigen?

25 S5: Äh, die Geschwindigkeit für Raumschiff B.

26 B: Ok. Der Passagier steht auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B mit ... ganz normalem,
27 gemütlichem Gehtempo. Welche Geschwindigkeit zeigt das Messgerät auf Raumschiff B jetzt für ihn an?

28 S5: Ähm, die Geschwindigkeit der Person, also wie sie halt, wie schnell sie geht.

29 B: Ok. Und die ..., das Gerät auf Raumschiff A?

30 S5: Äh, würd' die ... Geschwindigkeit vom Raumschiff, plus die Geschwindigkeit von der Person.

31 B: Mhm. Wir ersetzen den Passagier durch eine Lampe (auf Raumschiff B; Anm.) die in Richtung Spitze
32 von Raumschiff B leuchtet, die Lichtgeschwindigkeit ist dir ja bekannt, wären ungefähr 300.000 km/s.
33 Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?

34 S5: Ähm, die Lichtgeschwindigkeit, also die 300.000 km/s.

35 B: Ok, und das Gerät auf Raumschiff A?

36 S5: Genauso ... die Lichtgeschwindigkeit.

37 B: Mhm, ok, und was, wenn wir jetzt die Lampe auf Raumschiff A platzieren und sie leuchtet in Richtung
38 Heck von Raumschiff A. Was würde dann das Gerät auf A für das Licht messen?

39 S5: Ähm, wieder die Lichtgeschwindigkeit.

40 B: Und das (Messgerät; Anm.) auf Raumschiff B?

41 S5: Äh ... genauso die Lichtgeschwindigkeit.

42 B: Du sagst also, dass jedes Mal, von jedem Gerät die Lichtgeschwindigkeit gemessen wird.

43 S5: Ja.

44 B: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Gib- hat also die Bewegung der Raumschiffe gar keinen Einfluss
45 darauf?

46 S5: ... Ähm ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ... im ... Endeffekt, nein.

47 B: Mhm, wie kommst du zu dieser Aussage?

48 S5: Ähm, weil ... äh, definiert ist, dass die Lichtgeschwindigkeit immer die Lichtgeschwindigkeit ist, egal
49 in welchem System sie sich befindet, oder relativ zu welchem System.

50 B: Ok. Jetzt betrachten wir, auf beiden Raumschiffen, Messgeräte, die exakt bestimmen, ob Ereignisse
51 gleichzeitig stattfinden, oder nicht und Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B mit 100.000
52 km/s.

53 S5: Mhm.

54 B: Auf Raumschiff B befinden sich zwei Fernseher F1 und F2 und das Gerät auf Raumschiff B misst, dass
55 sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst das Gerät auf Raumschiff A?

56 S5: Ähm ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... es ... wird einen Unterschied messen, würd' ich sagen, also,
57 dass der, äh, Erste ... früher war als der Zweite.

58 B: Mhm, und ... wieso wäre das so?

59 S5: Ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... weil ... sich das, weil sich ja das, äh, Raumschiff A an Raum-
60 schiff B vorbeibewegt und dadurch ... ähm, der Erste näher am Raumschiff war, als ... der Zweite, für
61 Raumschiff A.

62 B: Mhm, und wenn das Messgerät die Daten über einen längeren Zeitraum hinweg sammelt und nachher
63 auswertet und damit berücksichtigt, wie weit sich die Fernseher entfernt befinden, wie würde es dann aus-
64 schauen?

65 S5: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... Ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... gute Frage und dann ...

66 würd' ich sagen hebt sich das wahrscheinlich auf, also dann sind sie, wird's wieder wahrscheinlich gleich
67 mess-, gleichmäßig, gleichzeitig ... gemessen.

68 B: Wir betrachten noch zwei Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff B und diesmal misst das Gerät auf
69 Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst dann das Gerät auf Raumschiff B?

70 S5: Ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... jetzt, rein logisch einfach eben, dass sie in dem Fall jetzt nicht
71 gleichzeitig waren, also, dass der ..., äh, Dreier (F3; Anm.) zuerst war und der ..., nein der Vierer (F4;
72 Anm.) zuerst war und dann der Dreier (F3; Anm.).

73 B: Mhm, und warum wäre das so?

74 S5: Ähm, damit sich das eben aufhebt, was ich vorhin gesagt hab', dass der eine zuerst war und der andere
75 erst danach.

76 B: Mhm, und wenn die Messgeräte wieder die Abstände berücksichtigen, wie würde es dann ausschauen?

77 S5: ... Ähm ... genau wie vorhin, also, dass das dann gleichzeitig war.

78 B: Mhm. Tatsächliche Messungen zum Thema ergeben, selbst wenn die Abstände berücksichtigt werden,
79 bei den Messungen, wird trotzdem immer etwas anderes gemessen. Das heißt, wenn das Gerät auf Raum-
80 schiff A sagt, die wurden gleichzeitig eingeschaltet, wird das Gerät auf Raumschiff B sagen, sie sind nicht
81 gleichzeitig eingeschaltet worden, auch wenn Abstände berücksichtigt werden. Was sagst du dazu?

82 S5: Ähm ... ergibt jetzt für mich so keinen Sinn.

83 B: Mhm. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Längen von Objekten exakt be-
84 stimmen können und Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s. Auf Raumschiff
85 B befindet sich eine Bowlingbahn und das Gerät auf Raumschiff B misst eine Länge von 18,3 m für die
86 Bowlingbahn. Welche Länge bestimmt dann das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn?

87 S5: Ähm, die Bowlingbahn würde kürzer werden ...

88 B: Mhm.

89 S5: ... weil sich ... ähm, das ... ah, wie soll ich sagen? Ähm, einfach ergibt, da das, das bewegte Objekt
90 zum stehenden Objekt eine kürzere Länge hat ...

91 B: Mhm.

92 S5: ... und dadurch auch die Bowlingbahn.

93 B: Mhm, und ... wenn wir umgekehrt eine Bowlingbahn auf Raumschiff A betrachten und das Gerät auf
94 Raumschiff A eine Länge von 18,3 m dafür misst, was misst dann das Gerät auf Raumschiff B für diese
95 Länge?

96 S5: Ähm ... ich würd' ich sagen wieder eine Verkürzung, da sich das Raumschiff B für sich selbst ja auch
97 sagen könnte, es bewegt sich nicht.

98 B: Mhm, ok. Und ... wie kommt es jetzt zu dieser Verkürzung?

99 S5: Ähm ... also dadurch, dass ... quasi ein, ein ... ähm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ein Unter-
100 schied in ... der, der Zeit is ... zwischen den zwei Objekten, ähm und sich ... die Geschwindigkeit ja
101 selbst nicht verändert, äh, muss ich, logischerweise, die Länge, oder die Strecke verändern.

102 B: Wie meinst du, ein Unterschied in der Zeit?

103 S5: Ähm, es ist ja die, das bewegte Objekt hat im System des unbewegten Objekts, Objekts, weniger Zeit,
104 ähm, is, es is weniger Zeit verstrichen ...

105 B: Mhm.

106 S5: ... ähm, als in dem ruhenden System.

107 B: Ok. Um die Länge zu bestimmen, müsste man ja gleichzeitig Anfangs- und Endpunkt bestimmen ...
108 und vorher hast du gemeint, wenn etwas im Raumschiff A gleichzeitig ist, dann wär's, auch im Raumschiff
109 B gleichzeitig. ... hätte das irgendwie einen Einfluss auf diese Längenbestimmung?

110 S5: Ähm ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... ich denke schon, ja. ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm
111 ... (13 Sekunden Pause; Anm.) ... also, ja, wenn man, wenn man wieder eben ... die, also die zwei Punkte
112 misst, als Anfangspunkt und Endpunkt der Bowlingbahn und dann da die Strecke nimmt dann schon, ja.

113 B: Mhm. Und wenn für beide Gleichzeitig dasselbe bedeutet, kann's dann einen Unterschied in der
114 Längenbestimmung geben, weil das hast du ja vorher gemeint, dass das ... für beide wäre gleichzeitig
115 jeweils dasselbe.

116 S5: ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ja wenn ... aber ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... aber es

117 wird dann ... nicht gleichzeitig, weil es ja, es hat ja, es gibt ja dann einen Unterschied ...
 118 B: Mhm.
 119 S5: ... ähm, von Anfangspunkt und Endpunkt ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... für das Raumschiff B
 120 dann.
 121 B: Ok, also zwar würde hier (auf Raumschiff A; Anm.) das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) gleichzeitig
 122 bestimmen und hier (auf Raumschiff B; Anm.) würde es (das Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) nicht
 123 gleichzeitig bestimmen ...
 124 S5: Ja.
 125 B: ... aus Sicht von Raumschiff A, ok. Jetzt messen beide verschiedene Längen für die Bowlingbahn gibt's
 126 da jetzt einen richtigen und falschen Wert und welcher wäre das?
 127 S5: Ähm ... nein, es gibt keinen richtigen oder falschen Wert, weil für ... jeweils die zwei Raumschiffe is'
 128 ja ihr Bezugssystem quasi das richtige ...
 129 B: Mhm.
 130 S5: ... ähm, als ... äh, logischen Wert würde man wahrscheinlich den von Raumschiff A nehmen, also
 131 dort wo sich die Bowlingbahn befindet ...
 132 B: Mhm.
 133 S5: Aber so generell, der Wert von Raumschiff B ist genau so richtig wie von Raumschiff A.
 134 B: Ok. Könnte man irgendwie von außerhalb drauf schauen und einen absolut richtigen Wert bestimmen,
 135 für die ... Länge der Bowlingbahn?
 136 S5: Äh, nein, weil es wär' ja nur wieder quasi ein anderer Wert aus einem anderen Bezugssystem und
 137 wieder halt nur ein, auch ein weiterer richtiger Wert.
 138 B: Mhm. Jetzt haben wir auf einem Raumschiff, dass sich relativ zur Erde mit 100.000 km/s bewegt und
 139 auf der Erde Messgeräte die Längen von Objekten exakt bestimmen können ...
 140 S5: Mhm.
 141 B: ... und eine Bowlingbahn auf der Erde. Das Gerät auf der Erde misst für diese eine Länge von 18,3 m.
 142 Was misst das Gerät auf dem Raumschiff für diese Länge?
 143 S5: ... ähm ... sie ... misst genauso wieder einen Unterschied ...
 144 B: Mhm.
 145 S5: ... in der Länge.
 146 B: Und gäb's hier jetzt einen richtigen (und; Anm.) einen falschen Wert?
 147 S5: Nein, eigentlich wieder nicht. Es ist genau dasselbe ... wie davor mit den zwei Raumschiffen.
 148 B: Mhm, danke.

Interview 6:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B, ... du befindest dich auf Raumschiff A und du siehst, dass
 2 Raumschiff B sich relativ zu Raumschiff A bewegt. Hast du eine Möglichkeit festzustellen, ob sich wirklich
 3 Raumschiff B bewegt, oder vielleicht doch Raumschiff A, oder sogar beide?
 4 S6: ... wenn's keinen anderen Anhaltspunkt gibt nicht.
 5 B: Und, äh, wäre, wenn wir jetzt eine Sicht von draußen einnehmen würden? ... könnt' jemand von außen
 6 sagen wer sich bewegt?
 7 S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, äh, wenn der draußen sozusagen ruhend ist, dann kann er schon
 8 sehen welches auch ruhend ist und welches sich bewegt, aber, wenn er draußen sich auch bewegt ...
 9 B: Mhm.
 10 S6: ... kann es ja sein, dass er sich mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt, wie das was er sieht was
 11 ruhend ist und deswegen bewegt sich das auch. (lacht)
 12 B: Ok. Ok. Und wenn der draußen ruhend ist, ähm, könnte dann nicht einer von denen sagen „nein der
 13 bewegt sich und ich ruhe“?
 14 S6: Ja. Es kommt drauf an, aus welcher Sicht man's sieht.
 15 B: Hm, also könnte man jetzt absolut sicher sagen einer bewegt sich, einer ... ruht, oder ...
 16 S6: Nein, kann man nicht.
 17 B: Ok. Gut ... wir betrachten jetzt auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Geschwindigkeiten exakt

18 bestimmen können. Dabei messen sie immer die ... Relativgeschwindigkeit ... zwischen sich selbst und
 19 dem Objekt, das sie messen. Also bewegt sich das auf's Messgerät zu, oder davon weg ...

20 S6: Mhm.

21 B: ... ja. Und wie wir gerade gesehen haben, ist ja nur die Relativgeschwindigkeit von Bedeutung, hier
 22 bewegt sich Raumschiff B, relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s.

23 S6: Mhm.

24 B: Und auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit zeigt dann das Gerät auf Raumschiff
 25 B für den Passagier an?

26 S6: ... ähm, ... keine Geschwindigkeit, also Null.

27 B: Mhm. Und das auf Raumschiff A? Wieder für den Passagier.

28 S6: ... das zeigt eine Geschwindigkeit an, weil ... es bewegt sich ja ... also sie bewegen sich ja gegenein-
 29 ander vorbei ...

30 B: Mhm.

31 S6: ... und es sollte dann 200.000 ... km/s, weil das eine bewegt sich ja in die Richtung ... mit 1.000,
 32 das andere in die andere Richtung mit 1.000.

33 B: Mhm, die Relativgeschwindigkeit von 100.000, die pa-, die fasst schon zusammen ...

34 S6: Ah so, ok, ok.

35 B: ... die gesamte Bewegung.

36 S6: Ja, dann sollte es (das Gerät auf Raumschiff A; Anm.) 100.000 ... anzeigen.

37 B: Ok. Jetzt steht der Passagier auf und geht gemütlich in Richtung Spitze des Raumschiffs B. Welche
 38 Geschwindigkeit misst dann das Gerät ... auf Raumschiff B für den Passagier?

39 S6: Also die Schritt-, ... also die Geschwindigkeit vom Passagier, so wie schnell er geht.

40 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

41 S6: ... hm, ja das sollte die ... halt die Geschwindigkeit, mit der sie sich relativ ..., äh, voneinander
 42 bewegen plus die Schrittgeschwindigkeit messen.

43 B: Ok.

44 S6: (lacht)

45 B: Jetzt ersetzen wir den Passagier durch eine Lampe ...

46 S6: Mhm.

47 B: ... auf Raumschiff B und sie leuchtet in Richtung Spitze von Raumschiff B.

48 S6: Mhm.

49 B: Licht bewegt sich mit ... ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raum-
 50 schiff B für das Licht?

51 S6: Die Lichtgeschwindigkeit.

52 B: Und das auf Raumschiff A? Wieder für das Licht.

53 S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, also es kann ja ... an sich nicht mehr messen als Lichtgeschwin-
 54 digkeit ... glaub' ich (lacht), ähm, und deswegen hätt' ich jetzt so gesagt auch Lichtgeschwindigkeit.

55 B: Ok. Und ... wenn wir die Lampe auf Raumschiff A platzieren ...

56 S6: Mhm.

57 B: ... und sie in Richtung Heck von Rau-, Raumschiff A leuchtet, was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff
 58 A für die Geschwindigkeit des Lichtes an?

59 S6: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., äh, also ... eines ... langsamere Geschwindigkeit dann, weil, wenn
 60 sich's bewegt ... ja eine langsamere Geschwindigkeit ...

61 B: Und das auf Raumschiff B?

62 S6: ... ähm, ... wieder die Lichtgeschwindigkeit, hätt' ich gesagt.

63 B: Ok, das heißt, das Gerät das sich relativ zur Lichtquelle gar nicht bewegt, das ... würde eine langsamere
 64 Geschwindigkeit anzeigen und das das sich relativ zur Quelle bewegt ... die Lichtgeschwindigkeit.

65 S6: Wobei, nein, das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) würde doch die Lichtgeschwindigkeit anzeigen, weil
 66 ... oder, ich mein', es bewegt sich halt das ganze System ...

67 B: Mhm.

68 S6: ... vorwärts und dadurch ist der ... Endpunkt sozusagen ein anderer.

69 B: Mhm.
70 S6: Und deswegen is ... der Weg länger ...
71 B: Mhm.
72 S6: ... den das Licht ... verbraucht, also, wenn's nur die Geschwindigkeit misst, würd' ich trotzdem da
73 Lichtgeschwindigkeit ...
74 B: Und hier?
75 S6: ... und da ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... da langsamer
76 als die Lichtgeschwindigkeit(?)
77 B: Ok. Tatsächlich ergibt sich, dass in jeder der Situationen jedes der Geräte genau die ... Lichtge-
78 schwindigkeit misst ... und keine Veränderungen. Die Relativgeschwindigkeit hat also überhaupt keine
79 Auswirkungen ... auf die Messung der Lichtgeschwindigkeit. Was sagst du dazu?
80 S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, also ich hätte, ... eh auch schon wie ich vorher gesagt hatte,
81 halt, weil die Licht-, weil's ja an sich nicht geht höher als Lichtgeschwindigkeit zu messen ...
82 B: Mhm.
83 S6: ... und dass es halt ... deswegen is ...
84 B: Und niedriger als die Lichtgeschwindigkeit? Weil hier hättest du ja gemeint, dass es was, äh, ... nied-
85 rigeres misst. Das geht ja jetzt ... offenbar auch nicht.
86 S6: Mhm. ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, also vielleicht
87 weil's einfach wirklich halt ... die Geschwindigkeit vom Licht misst und das dann halt den Weg nicht
88 berücksichtigt praktisch, oder wie, wie, wie ..., wie schnell's ... is ...
89 B: Hm, also, wenn du meinst nicht berücksichtigt, ähm, meinst du, dass ... es einfach keinen Unterschied
90 macht, oder, dass man es berücksichtigen müsste und dann auf einen anderen Wert kommen würde?
91 S6: ... naja, für's Messgerät macht's scho-, macht's anscheinend keinen Unterschied.
92 B: Ok.
93 S6: Und ... das misst's ja die absolute ... Geschwindigkeit vom ... dem ... Lichtstrahl, oder sowas,
94 deswegen, ja, macht's keinen Unterschied hätt' ich gesagt.
95 B: Ok. Wir betrachten jetzt auf beiden Raumschiffen Messgeräte die exakt bestimmen, ob Ereignisse gleich-
96 zeitig stattfinden, oder nicht. Auf Raumschiff B befinden sich die Fernseher F1 und F2 und Raumschiff A
97 bewegt sich, relativ zu Raumschiff B, mit 100.000 km/s. Das Gerät auf Raumschiff B misst, dass F1 und
98 F2 gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?
99 S6: Ich würd' sagen, dass es ... nicht gleichzeitig is, weil ... halt das bewegt sich ja vorbei und dadurch
100 merkt's praktisch früher, dass der eine eingeschalten wurde, als der andere.
101 B: Mhm, also, weil das Licht halt da erst hinkommen muss ...
102 S6: Ja genau.
103 B: ... und ... das, man könnte ja die Abstände ... bestimmen und die Positionen und dann wüsste man
104 ja wie lang das Licht braucht und man könnte das ja einrechnen ... und das Messgerät kann ja dann über
105 einen ... längeren Zeitraum die Daten sammeln und nachher das einrechnen ... und, ähm, herausrechnen,
106 diese Effekte. Was würde es dann anzeigen?
107 S6: ... wahrscheinlich immer noch, dass es nicht gleichzeitig is(?)
108 B: Und warum?
109 S6: ... ähm, ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ja einfach, weil sich's halt dadurch, dass es sich vorbeibe-
110 wegt, dass es dann was anderes anzeigt.
111 B: Mhm. Und wär' diese Anzeige dann prinzipiell richtig, oder wär' die dann falsch?
112 S6: Schon richtig, halt aus dem, ... aus der Sicht von dem Raumschiff A.
113 B: Ok. Jetzt misst das Gerät auf Raumschiff A, dass zwei Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff B gleich-
114 zeitig eingeschaltet werden, was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B an?
115 S6: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschalten werden.
116 B: ... und warum?
117 S6: (lacht), ähm, ja halt, ich hätt' das so gesagt wie vorher, is halt einfach nur ... anders von den Positio-
118 nen, also, es is ...
119 B: Mhm.

120 S6: ... zuerst halt, weil, dadurch wenn's vorbeigeht und dann wird's eingeschalten, is es ja nicht ... gleich-
 121 zeitig, dass es in dem Raumschiff B dann ... gleichzeitig is ...
 122 B: Mhm.
 123 S6: ... weil, eben wie vorher auch schon gesagt, dass es halt das eine zuerst misst, also wenn's so geht,
 124 merkt's das F4 zuerst und dann den F3 und ... ja das für Raumschiff B da, da bemerkt's sozusagen beide
 125 ... gleichzeitig.
 126 B: Mhm. Und ... tatsächlich ... könnte man ja auch diese Effekte berücksichtigen auch wo's vor, zuerst
 127 vorbeifliegt. Was würde es dann anzeigen, wenn man das alles berücksichtigt? Nämlich beide Messgeräte.
 128 S6: Wahrscheinlich wieder, dass was Unterschiedliches gleichzeitig is.
 129 B: ... und warum?
 130 S6: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, weil halt von ... einem anderen ... Standpunkt ausgegangen
 131 wird, sozusagen ...
 132 B: Mhm. Tatsächlich ergibt sich, dass auch, wenn alle Abstände und Lichtlaufzeiten berücksichtigt werden,
 133 Ereignisse, die in Raumschiff B gleichzeitig stattfinden aus Sicht des Raumschiff A sicher nicht gleichzeitig
 134 stattfinden. Was sagst du dazu?
 135 S6: ... ja, also das hab' ich so auch gelernt (lacht), also ich hätt's mir gedacht, aber ... ja, ich könnt es
 136 jetzt nicht erklären so, warum's so is.
 137 B: Mhm. Jetzt betrachten wir noch auf Raumschiff A und B Messgeräte die Längen exakt bestimmen
 138 können. Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raumschiff A, mit 100.000 km/s und auf Raumschiff B gibt
 139 es eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B misst die Länge 18,3 m für die Bowlingbahn. Welchen
 140 wert misst das Gerät auf Raumschiff A für diese Länge?
 141 S6: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, eine kürzere Länge(??)
 142 B: Was wäre, wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet. Das Gerät auf Raumschiff A misst
 143 hier eine Länge von 18,3 m. Was würde dann das Gerät auf Raumschiff B für diese Länge anzeigen?
 144 S6: ... also, ich glaub es is so, dass im bewegten System sind die Längen verkürzt ...
 145 B: Hm, was zeigt es dementsprechend an?
 146 S6: ... (lacht), eine kürzere Länge, hätt' ich gesagt.
 147 B: Ok, du würdest also sagen das Gerät, das sich relativ zur Bahn bewegt zeigt immer eine kürzere Länge
 148 an.
 149 S6: Ja, aus der Sicht von dem ... System, also dem Raumschiff A.
 150 B: Und was wäre die Ursache dafür?
 151 S6: ... ähm, ... (17 Sekunden Pause; Anm.) ... ja, ich weiß es nicht (lacht).
 152 B: Und würdest du sagen ... gibt es da richtige und falsche Werte und welcher Wert wär' denn der richtige?
 153 Wenn's einen richtigen gibt.
 154 S6: Also, es gibt keinen richtigen, oder falschen, weil's immer drauf ankommt, von wo man's betrachtet.
 155 B: Mhm, und welche Länge hat jetzt die Bowlingbahn?
 156 S6: Kommt drauf an von wo man's betrachtet. (lacht)
 157 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch ein Raumschiff, dass sich mit 100.000 km/s relativ zur Erde bewegt und
 158 auf dem Raumschiff und auf der Erde gibt es wieder Messgeräte die Längen exakt bestimmen. Auf der
 159 Erde gibt es eine Bowlingbahn und das Gerät auf der Erde misst für diese eine Länge von 18,3 m. Welchen
 160 Wert zeigt dann das Gerät auf dem Raumschiff für die Länge der Bowlingbahn an?
 161 S6: Ich hätte wieder einen kürzeren Wert ... gesagt ...
 162 B: Und gäb's hier einen richtigen, oder falschen?
 163 S6: Mm, nein, auch nicht, halt ... kommt drauf an, ob man am Raumschiff is, oder auf der Erde.
 164 B: Ok.

Interview 7:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B ... und du befindest dich auf Raumschiff A. Du siehst, dass
 2 sich Raumschiff B relativ zu Raumschiff A bewegt. Hast du irgendeine Möglichkeit festzustellen, ob sich
 3 wirklich Raumschiff B bewegt, oder vielleicht doch Raumschiff A, oder vielleicht sogar beide.
 4 S7: Ähm ... wir betrachten, wir sind in Raumschiff A(??)

5 B: Mhm.
 6 S7: Sind wir im bewegten, oder im, rel-, äh, im ruhenden System?
 7 B. Und das ist genau die Frage: Könntest du feststellen wer sich bewegt und wer ruht, oder ob sich vielleicht
 8 beide bewegen?
 9 S7: Äh, wenn wir in Raumschiff A das ruhende System sind, wenn wir das jetzt annehmen ...
 10 B: Mhm.
 11 S7: ... bewegt sich Raumschiff B.
 12 B: Mhm.
 13 S7: Wenn wir annehmen, dass wir im bewegten System sind, ruht Raumschiff B.
 14 B: Mhm.
 15 S7: Nein! Ja.
 16 B: Ja, ja, doch. Und würdest du sagen es gibt vielleicht von außen eine neutrale Sicht die jetzt ... fest-
 17 stellen könnte ... wer von beiden sich bewegt?
 18 S7: Wenn wir die uns, die Umgebung anschauen und da ist alles gleich, also da bewegt, man sieht ja, ob
 19 sich was bewegt, oder nicht, wenn das ... ruht, dann bewegen wir uns. Wenn sich das draußen bewegt,
 20 dann bewegt sich Raumschiff B und ... A ruht ... hab' ich das schon mal gesagt?
 21 B: Na das, das ist schon ... ich versteh' was du meinst. Ok, und für die gegebene Situation, würdest du
 22 sagen es ist wichtig, wer von beiden sich bewegt, oder ist das ... beliebig wählbar?
 23 S7: Das ist beliebig wählbar.(?)
 24 B: Mhm. Wir betrachten jetzt auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Geschwindigkeiten exakt bestim-
 25 men können. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s ... und auf Raumschiff
 26 B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für diesen Passagier?
 27 S7: ... misst das Messgerät ... die Geschwindigkeit von A, oder die Geschwindigkeit von dem wo sich
 28 jetzt Raumschiff ...
 29 B: Das Gerät auf Raumschiff B misst jetzt nur, wie ... bewegt sich der Passagier relativ zum Messgerät.
 30 S7: Der Passagier bewegt sich gar nicht zum Messgerät, weil sich das in dem bewegten System nicht
 31 verändert, also die Geschwindigkeit verändert sich nicht.
 32 B: Ok. Und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für eine Geschwindigkeit für den Passagier messen?
 33 S7: ... die Geschwindigkeit von dem Raumschiff.(?)
 34 B: Mhm. Der Passagier steht auf und geht gemütlich Richtung Spitze von Raumschiff B. Welche Geschwin-
 35 digkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?
 36 S7: Die Geschwindigkeit die der ... Mensch zurücklegt.(?)
 37 B: Mhm.
 38 S7: Also, gemütlich.
 39 B: Ja. Und das Gerät auf Raumschiff A, was misst das für seine Geschwindigkeit?
 40 S7: ... die Geschwindigkeit von der Rakete plus die Geschwindigkeit von dem Menschen.
 41 B: Mhm. Wir ersetzen den Passagier durch eine Lampe. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt 300.000 km/s
 42 und die Lampe leuchtet in Richtung Spitze von Raumschiff B. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät
 43 auf Raumschiff B ...
 44 S7: Lichtgeschwindigkeit.
 45 B: ... für das Licht? Und das auf Raumschiff A?
 46 S7: Lichtgeschwindigkeit.
 47 B: Ok. Und wenn wir die Lampe auf Raumschiff A aufstellen und es leuchtet in Richtung Heck, was ...
 48 (würde das Gerät auf Raumschiff A für die Geschwindigkeit des Lichtes messen; Anm.)
 49 S7: Lichtgeschwindigkeit.
 50 B: Und das auf Raumschiff B?
 51 S7: Lichtgeschwindigkeit.
 52 B: Sagst du also in dem Fall hat die Relativgeschwindigkeit keine Auswirkung?
 53 S7: Mhm.
 54 B: Und warum wäre das so?
 55 S7: Weil ..., ah da gab's die Formel und wenn man das dann, wenn man c einsetzt, dann kürzt sich das

56 so heraus, dass c immer c ist.
 57 B: Mhm. Das heißt ...
 58 S7: Es bleibt bei den 300.000.
 59 B: Ok. Ok. Neue Situation. Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte, die exakt bestimmen, ob zwei
 60 Ereignisse gleichzeitig stattfinden, oder nicht.
 61 S7: Mhm.
 62 B: Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B mit 100.000 km/s und auf Raumschiff B gibt es zwei
 63 Fernseher, F1 und F2.
 64 S7: Mhm.
 65 B: Das Gerät auf Raumschiff B misst, dass beide Fernseher gleichzeitig eingeschaltet werden.
 66 S7: Mhm.
 67 B: Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?
 68 S7: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschaltet werden?
 69 B: Mhm.
 70 S7: Weil ... gleichzeitig ist es ja nur, wenn von dem Betrachter aus ...
 71 B: Mhm.
 72 S7: ... die Positionen der Fernseher genau in der Mitte ist ...
 73 B: Mhm.
 74 S7: ... also der Winkel quasi ist, ... muss gleich groß sein.
 75 B: Mhm.
 76 S7: Und ... wenn sich das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) jetzt bewegt, dann verändert sich ja ...
 77 die ...
 78 B: Mhm.
 79 S7: ... dieser Winkel.
 80 B: Mhm.
 81 S7: Also würde von ... dem Betrachter, also von dem Raumschiff A ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ...
 82 entweder der Fernseher 1, oder der Fernseher 2 zuerst eingeschaltet werden und nicht gleichzeitig.
 83 B: Mhm, was würdest du da schätzen, welcher würde denn zuerst eingeschaltet werden?
 84 S7: ... Fernseher ... 2(?)
 85 B: Weil?
 86 S7: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... weil wir uns in die Richtung bewegen und dann ist der Fernseher 2
 87 zuerst dran und dann erst der Fernseher 1.
 88 B: Mhm.
 89 S7: Äh, Fernseher 2 und dann Fernseher 1.
 90 B: Ja, ok. Jetzt haben wir ... F3 und F4, also noch zwei Fernseher auf Raumschiff B und jetzt misst das
 91 Gerät auf Raumschiff A, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raum-
 92 schiff B an?
 93 S7: Dass sie nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, ... sondern, dass der Fernseher 3 zuerst eingeschaltet
 94 wird und dann der Fernseher 4(?)
 95 B: Mhm, warum wäre der ... Fernseher 3 zuerst eingeschaltet?
 96 S7: Weil er näher beim Messgerät steht.
 97 B: Ok. Und wenn die Messgeräte ihren Abstand von ... diesen Fernsehern jeweils berücksichtigen und
 98 ... alle Daten sammeln über einen Zeitraum hinweg und dann das so rechnen als wären sie ... in einer
 99 Position exakt in der Mitte zwischen den Fernsehern. Was würden die Geräte dann feststellen?
 100 S7: Fernseher A würde immer noch gleichzeitig.
 101 B: Mhm.
 102 S7: Ähm, das Messgerät von der Rakete A würde immer noch gleichzeitig sein ... und das Messgerät in
 103 Rakete 2 müsste in der Mitte stehen.
 104 B: Mhm.
 105 S7: Weil, damit die Entfernung gleich ist, weil so ... misst entweder die Fernseher hintereinander, oder
 106 nebeneinanderstehen und nicht ... voreinander.

107 B: Aber es (das Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) könnte ja seine Entfernung berücksichtigen und das
108 einrechnen.

109 S7: Ja aber ... trotzdem ist die Länge zwischen ... Fernseher, also, in der Abbildungen zwischen dem
110 Messgerät und Fernseher 4 länger als die ... Länge zwischen Fernseher 3(??)

111 B: Mhm, und tatsächlich zeigt sich, ... auch wenn beide Geräte jeweils da in der Mitte positioniert werden,
112 dann würde trotzdem dieses Gerät (auf Raumschiff B; Anm.) messen, dass sie nicht gleichzeitig eingeschalt-
113 tet werden. Was sagst du dazu? Auch wenn's ... in der Mitte wär.

114 S7: Ist das ein Fakt, oder wir, nehmen wir das an?

115 B: Das ist ein Fakt.

116 S7: ... (14 Sekunden Pause; Anm.) ... weiß ich nicht, ähm ...

117 B: Mhm.

118 S7: ... ähm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... aber die Längen sind auch die Läng-, also die (Fernseher
119 F3 und F4; Anm.) schalten sich gleichzeitig ein, aber das Messgerät (auf Raumschiff B; Anm.) misst das
120 nicht?

121 B: Also dieses Messgerät (auf Raumschiff A; Anm.) würde, wenn's da in der Mitte auch wär bestimmen,
122 die (Fernseher F3 und F4; Anm.) sind gleichzeitig eingeschaltet und dieses (Messgerät auf Raumschiff B;
123 Anm.) selbst wenn's in der Mitte wär, würde dann messen, die sind nicht gleichzeitig eingeschaltet.

124 S7: Bewegt sich Raumschiff B? Nein, oder?

125 B: Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B.

126 S7: ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... weiß ich immer noch nicht, keine Ahnung.

127 B: Mhm. Und was könnte die Ursache vielleicht sein?

128 S7: Zeitdili-, dile-, diletation, dielation, keine Ahnung.

129 B: Ok.

130 S7: Aber weiß ich nicht, keine Ahnung.

131 B: Ok. Jetzt haben wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Längen exakt bestimmen. Raumschiff B
132 bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s und auf Raumschiff B gibt es eine Bowlingbahn.

133 S7: Mhm.

134 B: Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Wie lang ist diese
135 Bowlingbahn dann nach dem Mess-, Messgerät auf Raumschiff A?

136 S7: Das ist die Längenkontraktion, ah, warte, ähm, in dem ... ruhenden System sind die ... ist die Länge
137 verkürzt ... umgekehrt. ... (10 Sekunden Pause; Anm.) ... also wäre in dem Fall dann das Messgerät A,
138 also würde das Messgerät A die Länge verkürzt wahrnehmen.

139 B: Ok. Und wenn sich die Bowlingbahn jetzt auf Raumschiff A befindet und das Gerät auf A eine Länge
140 von 18,3 für, Meter für sie anzeigt? Was würde dann das Gerät auf Raumschiff B für sie (die Länge der
141 Bowlingbahn auf Raumschiff A; Anm.) anzeigen?

142 S7: ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... eine längere ... Bowlingbahn(??) Also, das Messgerät B jetzt?

143 B: Mhm.

144 S7: Dann misst das Messgerät eine längere Strecke bei ...

145 B: Ok. Tatsächlich ergibt sich, dass in ... jedem Fall das Messgerät, das sich relativ zur Bowlingbahn
146 bewegt, in dem Fall hier das auf Raumschiff A, in dem Fall das auf Raumschiff B, eine kürzere Länge
147 anzeigt, als das relativ zur Bahn ruhende. Was sagst du dazu?

148 S7: Wird wahrscheinlich stimmen. (lacht)

149 B: Ok. (lacht) Und würdest du sagen da gibt es jetzt einen richtigen und einen falschen Wert?

150 S7: Nein, weil ... von dem bewegten System ist das die exakte Länge, die das misst, nur ... im anderen
151 System, also in ... dem Fall jetzt in dem ruhenden System ist es halt ... eine andere Länge, aber es ist
152 trotzdem die exakte Länge.

153 B: Mhm, ok. Jetzt haben wir noch auf der Erde und auf einem relativ dazu mit 100.000 km/s bewegten
154 Raumschiff Messgeräte die Längen exakt bestimmen und auf der Erde eine Bowlingbahn.

155 S7: Mhm.

156 B: Das Gerät auf der Erde misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Welche Länge wird das Gerät
157 auf dem Raumschiff für diese Bowlingbahn messen?

158 S7: Eine längere Entfernung, weil ... weil ich ja vorhin schon gesagt hab, dass wenn sich das Raumschiff B
 159 bewegt ...
 160 B: Mhm.
 161 S7: ... wird die ... zu messende Distanz länger ...
 162 B: Mhm.
 163 S7: ... und in dem Fall wär dann die Bowlingbahn eben, aus der Sicht des bewegten Systems, länger.
 164 B: Mhm. Tatsächlich ergäbe sich auch hier, dass das relativ zur Bahn bewegte Gerät eine kürzere Länge
 165 feststellen wird.
 166 S7: Dann is da andersrum, also bei den anderen Raketen auch andersrum.
 167 B: Mhm. Würdest du hier sagen es gibt hier einen richtigen und einen falschen Wert?
 168 S7: Nein.
 169 B: Ok.
 170 S7: Is wieder das Gleiche.
 171 B: Mhm. Und welche Länge hat in diesen ganzen Fällen die Bowlingbahn dann tatsächlich?
 172 S7: Aus unserer Sicht 18,3 m ...
 173 B: Mhm.
 174 S7: ... und aus der Sicht des Raumschiffs ... kürzer.
 175 B: Ok.

Interview 8:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A und siehst, dass sich
 2 Raumschiff B relativ zu dir bewegt. Kannst du irgendwie feststellen, ob sich wirklich Raumschiff B bewegt,
 3 oder vielleicht doch Raumschiff A, oder sogar beide?
 4 S8: ... naja, also ... ich befinde mich auf A, ... äh, durch einen, ... müsste irgendein Bezugssystem
 5 herstellen ...
 6 B: Ok.
 7 S8: ... damit man kontrollieren kann, ob ... also, eben A sich bewegt, oder nur das was man außen sieht
 8 ...
 9 B: Mhm.
 10 S8: ... es könnte (unverständlich) als Näherung vielleicht ... oder vielleicht auch mithilfe einer Uhr ...
 11 beide ... hab' ich irgendwie Zugriff auf B? Also, ...
 12 B: Du befindest dich auf A, das is ...
 13 S8: ... oder ich hab' gar keinen ...
 14 B: ... hm, das Raumschiff A is das System, in dem du dich befindest. Kannst du das von dort irgendwie
 15 feststellen?
 16 S8: Hm, sicherlich, aber wahrscheinlich nur durch irgendwelche Mess- ... Messer in A selbst ...
 17 B: Mhm. Die was messen würden?
 18 S8: Die Geschwindigkeit und eben ... wenn sich's bewegt, dann zeigt die was an und wenn nicht, dann
 19 nicht.
 20 B: Mhm. Und würd-, du würdest also sagen von außen gäbe es eine Perspektive, wo man das beurteilen
 21 könnte?
 22 S8: Naja, wenn man außen irgendeinen Anhaltspunkt hat ...
 23 B: Mhm.
 24 S8: ... dann könnte man ... das schon beurteilen, aber wenn's außen rum einfach schwarz is, weil, Weltall,
 25 dann ... könnt's schwer werden.
 26 B: Ok. Wir ... betrachten die Situation so, dass prinzipiell gar nicht wichtig is wer sich bewegt ... für
 27 jetzt und nur wichtig is ... es bewegt sich jemand.
 28 S8: Ok.
 29 B: Auf beiden Raumschiffen befinden sich Messgeräte die Geschwindigkeiten exakt bestimmen können.
 30 Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s und auf Raumschiff B sitzt ein Pas-
 31 sagier. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?

32 S8: ... 100.000 km/s, oder ...

33 B: Die befinden sich im gleichen Raumschiff ... und das Gerät misst immer, ob sich der Passagier ...

34 S8: Ach so!

35 B: ... vom Gerät entfernt, oder ...

36 S8: Ach so, ob sich der Passagier, na dann ... null ... m/s.

37 B: Und das Gerät auf Raumschiff A? ... was misst das ...

38 S8: Misst ...

39 B: ... für den Passagier?

40 S8: ... für den Passagier ... 100.000 ... m/s.

41 B: Ok. Der Passagier steht auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B. Welche Geschwindigkeit

42 misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?

43 S8: Hm ... es misst eine Kombi aus ... eben der eigentlichen Bewegung vom... Menschen ...

44 B: Mhm.

45 S8: ... und der generellen Bewegung vom ... Raumschiff.

46 B: Die befinden sich wieder auf dem gleichen Raumschiff.

47 S8: Hm, ich glaub's irgendwie trotzdem, weil war's nicht irgendwie so, dass, wenn ... das ... miteinander,

48 also das irgendwie zusammenspielt? Weil, wenn man sich selbst bewegt, in einem bewegenden ... Objekt,

49 wie im Zug ...

50 B: Mhm.

51 S8: ..., dass man ... eigentlich schneller geht als man ... tatsächlich geht(.)

52 B: Relativ zum Zug, oder relativ zu dem außerhalb des Zuges?

53 S8: ... relativ ... zum ... ach so, ... dann könnt's sein, dass es das für A gilt ...

54 B: Mhm.

55 S8: ... und, dass für B weiterhin nur das gilt was ... der ... Mensch halt wirklich sich bewegt.

56 B: Ok. Wir ersetzen den Passagier durch eine Lampe auf Raumschiff B ...

57 S8: Mhm.

58 B: ... die in Richtung Spitze des Raumschiffs leuchtet. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt 300.000 km/s.

59 Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?

60 S8: 300.000 km/s.

61 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

62 S8: ... hm ... bewegt sich eigentlich A noch? Das, irgendwie hab' ich das die ganze Zeit ignoriert.

63 B: Prinzipiell ...

64 S8: Bewegen ...

65 B: ... is ja egal ...

66 S8: Ja. (unverständlich)

67 B: ... wer sich bewegt, wir wissen nur, relativ zu Raumschiff A bewegt sich Raumschiff B ...

68 S8: Mhm, ok.

69 B: ... mit 100.000 km/s.

70 S8: Hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... wie die im, ... meiner Sicht ... in der bewegte Zustand vergeht

71 die Zeit ... langsamer ... im Bezug zum relativen, so war das, oder? Schon. ... aber gilt das das jetzt? Oh

72 Gott. (lacht)

73 B: Mhm, je-, jetzt geht's nur um die Geschwindigkeit ...

74 S8: Ja.

75 B: ... des Lichtes. Was das Gerät an- ...

76 S8: Aber Licht is doch immer konstant, also würd' ich auch da 300.000 km/s sagen.

77 B: Ok. Und was, wenn wir die Lampe auf Raumschiff A platzieren und sie in Richtung Heck von A leuch-

78 tet? Was misst dann das Gerät auf A für die Geschwindigkeit des Lichts?

79 S8: 300.000 km/s.

80 B: Und das Gerät auf Raumschiff B?

81 S8: ... ich bleib' mal drei, bei 300.000 km/s. (lacht)

82 B: Ok. Du hast da gemeint, dass, äh, das Licht immer konstant bleibt. Wie genau meinst du das?

83 S8: ... so wie, ich glaub irgendwie das war was, was Einstein ... behauptet hat, eben dass ... Lichtge-
84 schwindigkeit, also, dass man immer von c ausgeht ...
85 B: Mhm.
86 S8: ... und, dass sich das nicht verändert ...
87 B: Mhm.
88 S8: ... im Gegensatz zu, er hat ja auch gesagt, dass eben die ... Zeit plötzlich nicht mehr absolut is ...
89 B: Mhm.
90 S8: ... aber, dass eben die Lichtgeschwindigkeit immer ... gleichbleibt ...
91 B: Mhm.
92 S8: ... und, dass wir immer vom selben c ausgehen.
93 B: Mhm. Das heißt egal wie sich Messgerät und Lichtquelle relativ zueinander bewegen, es würde immer
94 c messen?
95 S8: ... so hätt' ich's verstanden. (lacht)
96 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die exakt bestimmen, ob Ereignisse gleich-
97 zeitig stattfinden, oder nicht.
98 S8: Mhm.
99 B: Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B mit 100.000 km/s. Auf Raumschiff B gibt es zwei
100 Fernseher, F1 und F2. Das Gerät auf Raumschiff B misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was
101 zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?
102 S8: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... wahrscheinlich wird es anzeigen, dass das was näher is sich
103 früher einschaltet, als das was ... sich davon wet-, wegbewegt(?)
104 B: Mhm. Und was, wenn die ... Messgeräte den Abstand berücksichtigen, wir könnten sie ja auch genauso
105 gut in die Mitte stellen ...
106 S8: Mhm.
107 B: ... wär ja möglich und genauso gut können wir das auch einrechnen. Was würde es (das Gerät auf
108 Raumschiff A; Anm.) dann anzeigen?
109 S8: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm ... dasselbe wie ... das Messgerät auf Raumschiff B, also ... ,
110 dass sich die (Fernseher F1 und F2; Anm.) gleichzeitig andrehen?
111 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch zwei Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff B und diesmal misst das Gerät
112 auf Raumschiff A, ... dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden.
113 S8: Mhm.
114 B: Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B an?
115 S8: ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... dasselbe(?)
116 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass ... auch wenn die Abstände eingerechnet sind und die Licht-
117 laufzeiten eingerechnet sind ... , dass wenn ein's dieser Gerät anzeigt Ereignisse finden gleichzeitig statt
118 das ... relativ dazu bewegte Gerät anzeigen wird, dass sie sicher nicht gleichzeitig stattfinden. Was sagst
119 du dazu?
120 S8: ... das is jetzt blöd. (lacht)
121 B: (lacht)
122 S8: ... ähm ... , dass sie (unverständlich) sicher nicht ... da war ja irgendein Gesetz der Gleichzeitig-
123 keit, spielt's darauf hinaus? ... wahrscheinlich. (lacht) aber wie ging das nochmal, irgendwie, irgendwas
124 is tatsächlich nur dann gleichzeitig, ... wenn ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... wahrscheinlich wird's
125 beeinflusst durch die Geschwindigkeit das Messgerät das auf Raumschiff A ...
126 B: Mhm. Wie meinst du „beeinflusst durch die Geschwindigkeit“?
127 S8: Weil sich das Messgerät auf Raumschiff A ... davon wegbewegt, also wenn man davon ausgeht, dass
128 es mit 100.000 km/s nur sich bewegt ...
129 B: Mhm.
130 S8: ... weil's eben nicht an selber ... Ort und Stelle ...
131 B: Mhm.
132 S8: ... und Zeit ... sich andreht, also dadurch is es nicht gleichzeitig(?)
133 B: Würdest du dann sagen es gibt hier eine richtige und eine falsche Messung?

134 S8: ... ich glaube jede rel-, Messung ist richtig für ... den Punkt ... an dem sie messen(?.)
 135 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte ... die Längen exakt bestimmen können.
 136 Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s und auf Raumschiff B befindet sich
 137 eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn die Länge 18,3 m. Welche Länge
 138 zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn an?
 139 S8: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... etwas ... Längeres? Oder Nein etwas ... Kürzeres.
 140 B: Mhm. Und wie kommt es dazu?
 141 S8: Weil ... von dem ... ruhenden System aus gesehen werden ... die ... Strecke, oder Längen im be-
 142 wegten System verkürzt angesehen.
 143 B: Ok. Was, wenn wir jetzt die Bowlingbahn auf Raumschiff A platzieren? Das Gerät auf Raumschiff A
 144 misst jetzt eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B für
 145 diese Länge an?
 146 S8: ... hm ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... wenn's da verkürzt war, als da ... (4 Sekunden Pause;
 147 Anm.) ... kann's dasselbe wieder sein? ... is das möglich? Weil eigentlich bewegt sich dem, das Messgerät
 148 in B ja immer noch ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' es wird weiterhin verkürzt wahrnehmen.
 149 B: Ok. Messungen ergeben auch, dass das Messgerät, das sich relativ zur Bowlingbahn bewegt, also in
 150 diesem Fall (wenn die Bahn auf Raumschiff B ist; Anm.) das Gerät auf A ...
 151 S8: Mhm.
 152 B: ... und in diesem Fall (wenn sich die Bahn auf Raumschiff A befindet; Anm.) das Gerät auf B, immer
 153 eine kürzere Länge anzeigt, wie du gesagt hast. Gibt es dabei jetzt einen richtigen und einen falschen Wert
 154 und welcher wäre das?
 155 S8: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... naja, so richtig, ich weiß nicht, ob man da von richtig und falsch
 156 sprechen kann, weil irgendwie hat ja ... man könnte sagen, ... das Messgerät, das die exakte Länge ...
 157 auf dem ... wo sich's (die Bowlingbahn; Anm.) halt auch befindet, wahrnimmt, is quasi richtig, weil, ...
 158 wir könnten's ja auch abmessen und würden theoretisch auf denselben ... Messwert kommen wie das
 159 Messgerät ...
 160 B: Mhm.
 161 S8: Aber irgendwie hat das andere Messgerät ja trotzdem recht, aus seiner Sicht aus ...
 162 B: Mhm.
 163 S8: ... oder, von seinem Bezug zum ... zur Bowlingbahn.
 164 B: Mhm. Also, welche Länge hat die Bowlingbahn tatsächlich?
 165 S8: Wahrscheinlich irgendwie 18,3, oder ... ja.
 166 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch ... ein Raumschiff, das sich relativ zur Erde mit 100.000 km/s bewegt
 167 und auch ... auf der Erde und auf dem Raumschiff gibt es Messgeräte die Längen exakt bestimmen. Auf
 168 der Erde befindet sich eine Bowlingbahn. Das Gerät auf der Erde misst für die Bowlingbahn die Länge
 169 18,3 m. Welche ... Länge misst dann das Gerät auf dem Raumschiff für die Bowlingbahn?
 170 S8: ... eine verkürzte.
 171 B: Und gäbe es hier einen richtigen und einen falschen Wert?
 172 S8: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' weiterhin, dass, es is, jeder aus seiner Sicht ... recht hat
 173 ...
 174 B: Mhm.
 175 S8: ..., oder ... ja.
 176 B: Und welche Länge hat die Bowlingbahn tatsächlich?
 177 S8: ... 18,3 m(?.)
 178 B: Ok.

Interview 9:

- 1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B und du befindest dich auf Raumschiff A.
- 2 S9: Mhm.
- 3 B: Du siehst, dass sich Raumschiff B, relativ zu dir, bewegt. Kannst du irgendwie feststellen, ob sich wirk-
 4 lich Raumschiff B bewegt, oder doch Raumschiff A, oder sogar beide?

5 S9: Nein, ich hab' kein Bezugssystem. Ich ... kann nicht wissen, ... welches Raumschiff sich bewegt, aus
6 meiner Sicht aus ... bewegt sich B.

7 B: Mhm.

8 S9: Genau.

9 B: Würdest du sagen es gibt eine Sicht von Außerhalb die das entscheiden könnte?

10 S9: ... ähm, eine Sicht von Außerhalb könnte es nur entscheiden, wenn's ..., keine Ahnung, irgendwie
11 im ... Ruhest-, ähm, ein ruhendes System, oder im Bezugssystem, ähm, ... ein allgemeingültiges gäbe,
12 demnach, also das gibt's nicht und demnach kann's auch von außen nicht ... entschieden werden ..., äh,
13 was sich jetzt an was vorbeibewegt, bewegt ... genau.

14 B: Ja, ok. Dementsprechend brauchen wir immer nur die Relativgeschwindigkeit und müssen gar nicht so
15 ... berücksichtigen wer sich da tatsächlich bewegt ...

16 S9: Genau.

17 B: ... oder nicht ... und deshalb betrachten wir jetzt, dass Raumschiff B sich, relativ zu Raumschiff A,
18 mit 100.000 km/s bewegt ...

19 S9: Mhm.

20 B: ... und es auf beiden ... Raumschiffen Messgeräte gibt die Geschwindigkeiten von Objekten exakt
21 bestimmen können. Auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf
22 Raumschiff B für den Passagier?

23 S9: ... ähm, ... für den Passagier ..., ah, 0 km/h, weil er sich ja genau, also, beide ... bewegen sich
24 genau gleich schnell.

25 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

26 S9: Das ... misst ... für den Passagier ... das ... Doppelte der Geschwindigkeit, das heißt ..., ja doch,
27 genau, 200.000 Kilometer ... pro ... Sekunde, haben wir g'sagt, oder?

28 B: Und ... warum das Doppelte?

29 S9: Ähm, weil sich praktisch beide mit Hundert-, wir haben g'sagt, ah so, nein, 100.000, relativ zueinander,
30 haben wir gesagt, das heißt sie misst 100.000, genau. Weil sonst würd' sich's addieren ... er misst 100.000
31 km/s.

32 B: Ok. Jetzt steht der Passagier auf und geht gemütlich in Richtung Spitze von Raumschiff B. Welche
33 Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?

34 S9: Ähm, die Geschwindigkeit mit der er zur Spitze geht, ähm, ...

35 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

36 S9: 100.000 plus ... die Geschwindigkeit, mit der er zur Spitze geht.

37 B: Ok.

38 S9: Wart, oder ... er geht in die Ri-, entgegengesetzte ..., ja doch, genau, genau. Wenn er in die andere
39 Richtung gehen würde, dann wär's Minus.

40 B: Ok. Jetzt ersetzen wir den Passagier durch eine Lampe auf Raumschiff B die in Richtung Spitze von
41 Raumschiff B leuchtet. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das
42 Gerät auf Raumschiff B für das Licht?

43 S9: ... ähm, das Gerät für's ... Licht, misst ganz normale ... Lichtgeschwindigkeit, also 300.000.

44 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

45 S9: Und ... auf Raumschiff A ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... misst's mehr als Lichtgeschwindigkeit,
46 ähm, also ... 400.000 ... Kilometer ... Pro ... Sekunde.

47 B: Ok. Jetzt platzieren wir die Lampe auf Raumschiff A und sie leuchtet in Richtung Heck von Raumschiff
48 A.

49 S9: Mhm.

50 B: Welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?

51 S9: Weiterhin ... 300.000 km/s, weil's ein geschlossenes System praktisch is ... auf Raumschiff ... B
52 jedoch, ähm, muss man jetzt anders rechnen ..., weil der Lichtstrahl geht in die gleiche Richtung, wie
53 das Raumschiff B sich bewegt ... deshalb is es, ähm, ... misst Raumschiff B ... 300.000 minus ... der
54 Relativgeschwindigkeit, also 100.000, das heißt 200.000 km/s.

55 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben ..., dass ... hier (wenn sich die Lampe auf Raumschiff A befindet;

56 Anm.) auch das Gerät auf Raumschiff B 300.000 km/s messen würde und in der vorigen Frage auch das
57 Gerät auf Raumschiff A 300.000 km/s. Was sagst du dazu?
58 S9: Ähm, ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... also, ... eine Sache die auf jeden Fall noch fix, das Licht is
59 konsta-, Lichtgeschwindigkeit is konstant ...
60 B: Mhm.
61 S9: Immer und überall ..., ähm, also, im Vakuum ... und ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... is es wirklich
62 so, oder is das nur ... hypothetisch, oder is das wirklich so, dass beide das messen?
63 B: Es is wirklich so.
64 S9: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... bei einer Geschwindigkeit von 100.000 ... Relativgeschwindigkeit
65 ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... hm ... (9 Sekunden Pause; Anm.) ..., äh, nämlich genau das, so ein
66 ähnliches Beispiel gemacht, auch mit Raumschiffen ... und es is komplett unintuitiv ...
67 B: Mhm.
68 S9: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., nein, also, für mich, das ... macht ... rein intuitiv überhaupt
69 keinen Sinn.
70 B: Ok.
71 S9: Genau, nein ..., macht keinen Sinn.
72 B: Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die exakt bestimmen, ob zwei Ereignisse
73 gleichzeitig stattfinden, oder nicht.
74 S9: Mhm.
75 B: Raumschiff A bewegt sich, relativ zu Raumschiff B, mit 100.000 km/s und auf Raumschiff B gibt es zwei
76 Fernseher, F1 und F2. Das Gerät auf Raumschiff B misst, dass beide Fernseher gleichzeitig eingeschaltet
77 werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?
78 S9: Ähm, das Gerät auf Raumschiff A ... also, auf Raumschiff B wird die Gleichzeitigkeit gemessen ...
79 und auf Raumschiff ... B haben wir natürlich eine Verzögerung der Signale.
80 B: Und was, wenn wir die ... Abstände zu den Fernsehern und die ...
81 S9: Genau, gleich machen.
82 B: ... Signallaufzeiten berücksichtigen würden?
83 S9: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., also, wenn wir's einrechnen würden, dann müssten wir eigentlich die
84 genau gleiche ... Zeit für beide Fernseher bekommen ... wenn sie auch wirklich gleichzeitig eingeschaltet
85 werden ... ja.
86 B: Ok. ... wir betrachten noch zwei Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff B ... und jetzt stellt das Gerät
87 auf Raumschiff A fest, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff
88 B an?
89 S9: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... das Gerät auf Raumschiff B ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ...,
90 mmm, ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ..., wenn das Gerät auf ... A ... misst, dass sie gleichzeitig sind, ...
91 dann das Gerät auf Raumschiff B ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ..., dann zeigt das Gerät auf Raumschiff
92 ... B, auch, dass sie gleichzeitig ... sind ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... was keinen Sinn macht ...
93 weil, we-, wenn ich davon ausgeh', dass das, was ich beim Letzen gesagt hab' richtig is ... dann müsst'
94 ich jetzt sagen auf B, ... ähm, ... auf B findet, also, auf B wird auch Gleichzeitigkeit gemessen. Ähm ...,
95 aber ich bin mir nicht sicher, ob das, was ich, ob das Letzte stimmt, was ich gesagt hab' ...
96 B: Mhm.
97 S9: ... ähm, weil ich weiß, wir haben das gemacht in Bezug auf das und Gleichzeitigkeit, also, dass für das
98 eine Raumschiff ..., ähm, die einen sagen ..., wir schalten das gleichzeitig ein, äh, wir haben das beim
99 Lichtstrahl gemacht, der in zwei Richtungen gesendet wird, glaub' ich, und die anderen sagen, hey, ihr
100 habt's g'schummelt, ähm, ... des ..., das is gar nicht gleichzeitig ... demnach, rein intuitiv, würd' ich
101 wieder sagen, es is, ähm, gleichzeitig ...
102 B: Mhm.
103 S9: ... aber rein logisch, von dem was ich jetzt ... weiß, kann's nicht gleichzeitig sein, also B müsste sagen,
104 nein, das is nicht gleichzeitig.
105 B: Und dann im Fall vorher (bei den Fernsehern F1 und F2; Anm.)?
106 S9: Eigentlich genau das Gleiche. Also, wenn ich so drüber nachdenke, müsste A wieder sagen, ähm, B war

107 nicht gleichzei-, also, es war nicht gleichzeitig, was auf Raumschiff B passiert is.

108 B: Ok. Tatsächlich ergibt sich ..., dass in ... der ersten Frage (bei den Fernsehern F1 und F2; Anm.)

109 das Gerät auf Raumschiff A anzeigen würde, dass sie nicht gleichzeitig eingeschaltet wurden und bei der

110 zweiten Frage (bei den Fernsehern F3 und F4; Anm.) das Gerät auf B sagt, dass sie nicht gleichzeitig

111 eingeschaltet wurden ...

112 S9: Ja.

113 B: ... obwohl Lichtlaufzeiten und Abstände berücksichtigt sind. Was sagst du dazu?

114 S9: Ähm, also, wir haben die Zeit- ... -dilatation gemacht ... und ... Zeit is ja ein Konzept das wir haben

115 ... und es ... Zeit vergeht verschieden ... ähm ... in relativ zueinander bewegten Systemen, das heißt,

116 wir haben zum Beispiel einen Astronaut irgendwo hinschicken ... ähm, altert der, langsamer, als die Leute

117 auf der Erde ... demnach, rein intuitiv macht's wieder keinen Sinn, weil wir, wir kennen's halt nicht, Re-

118 lativitätstheorie is halt außerhalb unserer ... Wahrnehmung, Großteils, aber ... rein logisch nachgedacht,

119 doch, also, macht's, macht Sinn.

120 B: Mhm. Und würdest du dann sagen, die sind jetzt gleichzeitig eingeschaltet worden, oder nicht?

121 S9: ... also, gleichzeitig, gleichzeitig is ein schwerer Begriff, gleichzeitig ... is immer im Bezug auf ein ...

122 höherliegendes System, wenn ich sage, hier auf der Erde, wir schalten beide gleichzeitig unsere Handys ein,

123 dann is Bezu-, im Bezug auf das Zeitsystem unserer ... Erde. Das Problem im ... Weltall is, wir haben

124 kein ..., ähm, keinen Zeit-, wie nennt man das, nicht Zeitäther, sondern, dass man kein, kein ruhendes

125 System ... außerhalb, äh, an de-, an dem wir uns richten können und demnach können wir Gleichzeitigkeit

126 gar nicht feststellen und deshalb würd' ich (unverständlich) sagen ... gleichzeitig ... is gar keine Frage,

127 die man sich stellen kann, weil, wir können's sowieso nicht bestimmen.

128 B: Mhm. Und würdest du sagen, die ... Erde wär' so ein ruhendes System?

129 S9: Ich glaub', die Erde is ein System, das wir als ruhendes System nehmen, weil's einfach praktisch is ...,

130 aber sie ist kein ruhendes System, es is einfach nur eine Vereinfachung für uns.

131 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die Längen exakt bestimmen können.

132 S9: Mhm.

133 B: Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raumschiff A, mit 100.000 km/s ... und auf Raumschiff B befindet

134 sich eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Länge der Bowlingbahn eine Länge von

135 18,3 m. Welche Länge zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn an?

136 S9: Ähm, also, es gibt ... bei der Relativitätstheorie auch sowas, äh, das nennt man ... Längenkontraktion.

137 Ähm, auch Längen sind nicht gleich, ähm, in relativ zueinander bewegten Systemen ... glaub', ja. Und

138 ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... so, wird's jetzt kürzer, oder länger ... messen, is die Frage. Ähm, ...

139 das relativ zueinander bewegt sich, die bewegen sich aneinander vorbei ... rein intuitiv würd' ich demnach

140 sagen ... es misst eine kürzere Strecke ... ja, also ... das auf Raumschiff A misst eine kürzere Strecke ...

141 für Raumschiff, also, für die ... Bowlingbahn auf Raumschiff B. Genau.

142 B: Ok. Was, wenn wir jetzt die Bowlingbahn auf Raumschiff A platzieren und das Gerät auf Raumschiff

143 A für diese eine Länge von 18,3 m anzeigt? Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B an?

144 S9: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... hatten wir vorhin nicht genau das Gleiche, nur, dass die Raumschiffe

145 umgedreht sind, praktisch? Demnach ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ah so, nein, die Bowlingbahn hat

146 sich ver-, ah, ok, genau. Ähm, ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... auf Raumschiff B, also rein nach meiner

147 Logik, weil ... sich beide ja praktisch ... in die entgegengesetzte Richtung ... bewegen, schrumpft für

148 mich, ähm, die Bowling- ... -bahn, -bahn praktisch, das heißt, ich würd' wieder sagen, ... die Bowlingbahn

149 ... is kürzer, also wird als kürzer wahrgenommen, von dem Raumschiff B aus.

150 B: Mhm.

151 S9: Genau.

152 B: Und ... was würdest du sagen, wie kommt es zu dieser Verkürzung in den beiden Fällen?

153 S9: ... ähm, wie kommt es zu der Verkürzung ... ähm, ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... ich weiß nicht,

154 vielleicht, also, ... man könnt's vielleicht erklären mit ... ganz ... normaler ... Formel, von wegen v

155 ist gleich s durch t. Ähm, ... Geschwindigkeit is ja konstant, also wir haben 100.000, äh, Kilometer ...

156 pro ... Sekunde ... Relativgeschwindigkeit, und ... jetzt hat sich praktisch unsere ... Zeit verändert,

157 das haben wir vorher schon festgestellt, Zeitdilatation. Demnach, ähm, ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ...

158 demnach muss sich die Länge ... genauso kontrahieren um ... praktisch das auszugleichen, was von der
159 Zeitdilatation verändert wurde, wenn Sie wissen, was ich mein', ... ähm ..., dass bei der Geschwindig-
160 keit wieder das ... Gleiche rauskommt, in Anführungsstrichen, ... das heißt ..., also, ... die Logik in
161 meinem Kopf war, als wir's gelernt haben, es, dass Zeitdilatation und Längenkontraktion sich praktisch
162 ausgleichen, und somit die Geschwindigkeit weiterhin gleichbleibt. Ähm, demnach macht's ... Sinn für
163 mich, dass ... da Längenkontraktion stattfindet, weil sonst, äh, wenn es nicht so wär, würd' der ..., der
164 Astronaut im Raumschiff ... also, wenn man jetzt sagen würde, der Rau-, Astronaut im Raumschiff, ähm,
165 der irgendwie weit fliegt, ähm, dem ... wurde befohlen mit einer genau gleichen Geschwindigkeit, äh,
166 Wörter aufzuschreiben, ja. Dann würde der in der ... gleichen Zeit praktisch mehr Wörter schaffen ...,
167 ähm, wenn keine Längenkontraktion vorbei, vorhanden is, wenn die Längenkontraktion vorhanden is ...
168 muss er praktisch das Wort auch lä-, also, es is, braucht er mehr Platz um das Wort zu schreiben und
169 demnach gleich sich das aus mit der ... Zeitdilatation, wenn Sie wissen, was ich mein', das is sehr abstrakt
170 jetzt, ja, ...

171 B: Mhm.

172 S9: ... ähm, aber so würd's für mich Sinn machen. Sie gleichen sich einfach aus, Zeitdilatation und
173 Längenkontraktion, genau.

174 B: Ok. Äh, würdest du sagen es gibt jetzt da einen richtigen und einen falschen Wert ... und ... welcher
175 wäre da richtig?

176 S9: Ähm, das is genau das Gleiche, wie bei der Zeitdilatation, ähm, es gibt keinen richtigen und keinen
177 falschen Wert, wir haben kein, ähm, höheres Bezugssystem ...

178 B: Mhm.

179 S9: ... das Einzige, was wir haben, is die Erde als Bezugssystem, in, ... die nehmen wir als Bezugssystem,
180 oder als, als Ruhesystem, in Anführungsstrichen ...

181 B: Mhm.

182 S9: ... obwohl sie das nicht is ...

183 B: Mhm.

184 S9: ... ähm, demnach, nein, es gibt kein ... richtiges System, für jeden is sein eigenes System richtig ...

185 B: Mhm.

186 S9: ... und ... in den meisten Fällen is für jeden auch nur sein eigenes Sy-, System relevant, das is zum
187 Beispiel im Fall der Erde ... uns interessiert nicht wie Zeit am ... Mars vergeht, oder so, ...

188 B: Mhm.

189 S9: ... also, das ist ... bis jetzt noch nicht wichtig.

190 B: Und ..., wenn du sagst ... wir haben kein höheres Bezugssystem, meinst du, wir haben in dieser
191 Situation keines, oder ...

192 S9: Wir haben generell keines.

193 B: Mhm.

194 S9: Es gibt, also, das U-, Universum is von uns als ... unendlich wahrgenommen und ... man hat ja
195 gemessen, dass es ... noch immer am Expandieren is ..., ähm, ... und wir wissen nicht, was ... außer-
196 halb, also, wir können uns nicht mal vorstellen, was außerhalb des Universums is, weil ... für uns muss
197 irgendwas dort sein, aber ... es is nicht irgendwie so, als wär das ..., keine Ahnung, irgendein, ein Würfel
198 an dem wir uns ... jetzt, äh, ... orientieren würden, ...

199 B: Mhm.

200 S9: ... also, es gibt generell kein ruhendes System im Universum.

201 B: Mhm. Und welche Länge hat die Bowlingbahn tatsächlich?

202 S9: ... wie meinst du tatsächlich? Ach so, ach so, hm ... das is natürlich ... (3 Sekunden Pause; Anm.)
203 ..., also für Raumschiff A hat sie natürlich die ... Länge von, äh, 18,3 m ... und für Raumschiff B dann
204 eine kürzere Länge, dementsprechend ..., ähm, ..., wobei das dann so eine Frage is ... was man für
205 sinnvoll, als was ..., sie hat für beide Bezugssys-, also, für beide, beide Raumschiffe hat's eine verschieden
206 Länge, das wissen wir ..., ähm, ... man muss sich dann wahrscheinlich einfach entscheiden was am Sinn-
207 vollsten is, ob's sinnvoll is, dass jeder mit seinen eigenen Längen misst ..., oder, ob man sagt ..., ähm,
208 ... nein, wir nehmen jetzt das Raumschiff A als Bezugssystem für alles und demnach wird auch alles was

209 in Raumschiff B passiert nach den ... Werten von Raumschiff A ... berechnet, praktisch. Das heißt, man
 210 müsst sich irgendwie einigen, auf einen Wert, aber ... es gibt kein, ... keine wirkliche Länge.
 211 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch, dass sich ein Raumschiff mit 100.000 km/s an der Erde vorbeibewegt
 212 ... und es auf dem Raumschiff und auf der Erde Geräte gibt die Längen exakt bestimmen. Auf der Erde
 213 gibt es eine Bowlingbahn ... und das Gerät auf der Erde misst für diese eine Länge von 18,3 m. Welche
 214 Länge zeigt dann das gerät auf dem Raumschiff für die Bowlingbahn an?
 215 S9: ... ok, also, jetzt ... is das Raumschiff ... relativ zur Erde bewegt ... ähm, ... so Sachen wie ... Er-
 216 drotation und so lassen wir jetzt einfach ... außer Acht. Ähm, ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... überleg'
 217 grad ... das müsste man eigentlich direkt ummünzen können von ..., also, von dem Beispiel, das wir
 218 vorhin hatten ..., ähm, ... weil es geht ja wieder um Relativgeschwindigkeit, dann is es egal, ob sich die
 219 Erde bewegt, oder Raumschiff A bewegt, es geht ... drum, ... was zwischen den beiden passiert ..., ähm,
 220 ... demnach würd' ich ... genau das gleiche Ergebnis wie vorhin sagen ... die Länge is für das Raumschiff
 221 ... kürzer, als sie auf der Erde gemessen wird.
 222 B: Mhm.
 223 S9: Genau.
 224 B: Und gäb's hier jetzt einen richtigen und einen falschen Wert?
 225 S9: Ähm, ... wenn man exakt is, nein, gibt keinen richtigen Wert ...
 226 B: Mhm.
 227 S9: ... für uns ... rein logisch und rein praktisch is der Wert auf der Erde der richtige Wert, weil das is
 228 für uns der relevante Wert. Der Wert vom Raumschiff is ... in ... zumindest bis jetzt, wir haben noch
 229 keine anderen Planeten besiedelt ..., äh, irrelevant.
 230 B: Ok. Danke.

Interview 10:

1 B: Wir betrachten wieder zwei Raumschiffe A und B, du befindest dich auf Raumschiff A und siehst,
 2 dass sich Raumschiff B relativ zu dir bewegt. Gibt es jetzt eine Möglichkeit festzustellen, ob sich wirklich
 3 Raumschiff B bewegt, oder vielleicht doch Raumschiff A, oder sogar beide?
 4 S10: Ähm, ich glaub' nicht, weil, da sich beide ... ähm, weiß ich, ob sich beide Körper bewegen, oder
 5 nicht?
 6 B: Du siehst nur, irgendwas passiert zwischen denen ja.
 7 S10: Ok. Da ich auf A quasi drauf bin aber nicht, nicht gleichzeitig auf B, weil das natürlich nicht sein
 8 kann, äh, kann ich nicht feststellen, ob es sich tatsächlich, äh, bewegt, oder ob ich mich bewege, ich seh'
 9 nur, dass B, relativ zu A bewegt.
 10 B: Würdest du sagen es gäbe eine Sicht von draußen, bei der man das entscheiden könnte?
 11 S10: Äh, von draußen würd' ich schon sagen, dass es ... äh, entscheidbar, oder feststellbar wär', ähm, aber
 12 da wir uns auf A befinden und wir uns vielleicht auch bewegen, deswegen nicht, also, weil ich ja ... jetzt
 13 auf A bin, aber von außen wahrscheinlich schon.
 14 B: Ok. Raumschiff B bewegt sich jetzt relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s. Auf beiden Raumschiffen
 15 gibt es Messgeräte, die Geschwindigkeiten von Objekten, oder Körpern, oder Menschen genau bestimmen
 16 können. Auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das gerät auf Raumschiff B
 17 für diesen sitzenden Passagier?
 18 S10: Ähm, wie schnell sich, äh, der Körper, der sich relativ zu B, äh, bewegt, wie schnell das ist.(?)
 19 B: Ja, und sie befinden sich jetzt beide auf dem gleichen Raumschiff ... und das Gerät misst ja immer,
 20 wie schnell sich der Passagier relativ zum Gerät selbst bewegt. Wie viel wäre das in dem Fall?
 21 S10: Äh, können sie's nochmal wiederholen, also, wenn sich der Messgerät, also das ...
 22 B: Genau, das Gerät misst immer, wie schnell sich etwas relativ zum Gerät selbst bewegt.
 23 S10: Mhm.
 24 B: Und jetzt sitzt der Raumschi-, äh, der Passagier im gleichen Raumschiff wie das Gerät. Welche Ge-
 25 schwindigkeit zeigt dann dieses Gerät für die ... Geschwindigkeit des Passagiers an?
 26 S10: Ähm, wahrscheinlich so viel wie, ... ähm ... wie das am Anfang gesagt wurde. 100.000 ...
 27 B: Mhm.

28 S10: ... war das glaub' ich.
 29 B: Mhm.
 30 S10: Meter pro Sekunde. Ähm, da sich B auch so schnell bewegt und dieses Messgerät sich auf B befindet.
 31 B: Mhm, entfernt sich der Passagier von dem Messgerät, wenn er sitzt?
 32 S10: Nein, also das ...
 33 B: Und genau das misst aber das Gerät, ob er sich entfernt vom Gerät, oder nicht. Und was würde es dan
 34 anzeigen?
 35 S10: Mmm. ..., dass es sich nicht entfernt, weil es sich, weil es mit B weiter ... fährt, oder fliegt, quasi.
 36 B: Genau, die Geschwindigkeit wär' dann ...
 37 S10: Gleich, also halt ... ja.
 38 B: Ok. Und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für die Geschwindigkeit dieses Passagiers messen?
 39 S10: Ähm, ich glaub', ähm, da es ebenfalls auf B liegt und B bewegt sich relativ zu A, dann bewegt sich
 40 diese Person auch relativ zu A und dann würde dieses Gerät das messen, wie ... schnell B und diese Person
 41 sich bewegen dann.(?)
 42 B: Genau. Jetzt steht der Passagier auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B, ganz gemütlich mit
 43 normalem Gehtempo. Welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf (Raumschiff; Anm.) B für diesen
 44 Passagier?
 45 S10: Ich glaub' grundsätzlich das wo-, womit halt B, hm, fährt, äh, plus diese Geschwindigkeit, was diese
 46 Person, sich annimmt.
 47 B: Aber das Gerät fährt ja selber mit.
 48 S10: Ja. ... ähm, ich würd' sie trotzdem addieren, also das 100.000 m/s und diese Geschwindigkeit von
 49 dieser Person.
 50 B: Mhm. Und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier messen?
 51 S10: ... mmm ... also grundsätzlich, wie sich B relativ zu A, ähm, bewegt, und diese Person noch
 52 zusätzlich.
 53 B: Ok.
 54 S10: Was dazugibt.
 55 B: Jetzt ersetzen wir den Passagier durch eine Lampe (auf Raumschiff B; Anm.), die Lichtgeschwindigkeit
 56 beträgt 300.000 km/s und die Lampe leuchtet in Richtung Spitze von Raumschiff B.
 57 S10: Mhm.
 58 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?
 59 S10: ... also das verändert sich glaub' ich gar nicht, diese Lichtgeschwindigkeit.
 60 B: Und das (Gerät; Anm.) auf Raumschiff A, was misst das für das Licht?
 61 S10: Mm, genauso, also es verändert sich nicht.
 62 B: Mhm. Und was, wenn die Lampe auf Raumschiff A wäre und in Richtung Heck von Raumschiff A
 63 leuchtet, was messen dann die beiden Geräte?
 64 S10: Ich glaube es ändert sich ... noch immer nicht, also Lichtgeschwindigkeit bleibt dann gleich.
 65 B: Mhm. Du meinst also ..., äh, hätte die Geschwindigkeit, die Relativgeschwindigkeit irgendeinen Ein-
 66 fluss auf die Lichtgeschwindigkeit?
 67 S10: Ähm, nein. Glaub' nicht.
 68 B: Und warum nicht?
 69 S10: Ähm, weil es einfach ... grundsätzlich so schnell ist, dass es nicht beeinflusst werden kann, davon.
 70 B: Ok. Jetzt haben wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die exakt bestimmen, ob zwei Ereignisse
 71 gleichzeitig stattfinden, oder nicht und Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B mit 100.000
 72 km/s. Auf Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2. Das Gerät auf (Raumschiff; Anm.) B misst,
 73 dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst dann das Gerät auf Raumschiff ... A?
 74 S10: ... ebenfalls, ob sie gleichzeitig eingeschaltet werden.(?)
 75 B: Und würde es anzeigen sie werden gleichzeitig eingeschaltet, oder nicht?
 76 S10: ... wenn sie gleichzeitig eingeschaltet werden, dann schon, äh, und wenn nicht, dann nicht.
 77 B: Mhm. Und wenn das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) messen würde, sie werden gleichzeitig eingeschalt-
 78 tet, und das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) würde was anderes messen, was wär' dann die Ursache?

79 S10: Ähm, dass sich beide Körper, also Raumschiffe bewegen und es, ähm, beeinflusst diese Messgeräte
80 vielleicht?
81 B: Mhm.
82 S10: Also, auf Raumschiff A, mein' ich jetzt.
83 B: Ok. Noch zwei Fernseher, F3 und F4, auf Raumschiff B. Diesmal misst das Gerät auf Raumschiff A,
84 dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was misst dann das Gerät auf Raumschiff ... B?
85 S10: ... ähm, auch, ob ... sie sich gleichzeitig ein ... schalten, aber ich glaub', das wär' dann genauer,
86 weil ...
87 B: Mhm.
88 S10: ... das befindet sich, also dieses Messgerät befindet sich ebenfalls auf Raumschiff B.
89 B: Mhm. Tatsächliche Messungen ergeben, wenn die Geschwindigkeit, wenn dem ..., die Abstände auch
90 berücksichtigt werden, von den Messgeräten, dann würde es so sein: Wenn das Gerät auf einem Raumschiff
91 sagt, gleichzeitig, würde das Gerät auf dem anderen Raumschiff sagen, die sind sicher nicht gleichzeitig
92 eingeschaltet worden. Was sagst du dazu?
93 S10: Ähm, ja, also ich glaub' eines muss davon stimmen, ...
94 B: Mhm.
95 S10: ... ähm, und es hängt glaub' ich davon ab, wie ... diese zwei Körper zueinander stehen ...
96 B: Mhm.
97 S10: ... und wie sie sich relativ zueinander bewegen.
98 B: Mhm.
99 S10: Ähm, und ja.
100 B: Ok. Jetzt haben wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die Längen exakt bestimmen können. Auf
101 Raumschiff B befindet sich eine Bowlingbahn und Raumschiff B bewegt sich mit 100.000 km/s relativ zum
102 Raumschiff A. Das Messgerät auf Raumschiff B bestimmt eine Länge von 18,3 m für die Bowlingbahn.
103 Welche Länge wird dann das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn anzeigen?
104 S10: Naja, da es vorher gesagt wurde, dass die zwei Geräte nicht übereinstimmen, würd' ich sagen ...
105 B: Mm, das ist jetzt schon eine neue Situation.
106 S10: ... oder ist das is was anderes, oder ...
107 B: Ja.
108 S10: Ähm, dann würd' ich, ähm ... sagen, dass das wahrscheinlich von Raumschiff A aus nicht genau
109 bestimmt werden kann ...
110 B: Mhm.
111 S10: ... weil, ähm, ein Raumschiff von beiden bewegt sich ...
112 B: Mhm.
113 S10: ... und da dieses Messgerät sich auf B befindet und quasi mit dieser Bowlingbahn sich bewegt, ist es
114 leichter ... zu messen, wie lang das auch ist, aber wenn sich zum Beispiel B bewegt, dann is' A ... das,
115 dann kann es natürlich nicht so genau sein, weil es in Bewegung steht, oder ... in Bewegung ist.
116 B: Und wenn wir eine Bowlingbahn auf Raumschiff A betrachten und das Gerät auf Raumschiff A be-
117 stimmt für dieses eine Länge von 18,3 m ... wie wird dann ... äh, welche Länge wird dann vom Gerät auf
118 Raumschiff B angezeigt ... für die Bowlingbahn?
119 S10: Mm ich glaub' es is' so wie ... vorher, weil jetzt bewegt sich B auch noch trotzdem mit 100.000 km/s
120 und dann wär' halt (das Messgerät auf Raumschiff; Anm.) A genauer als B.(?)
121 B: Mhm. Tatsächliche Messungen ergeben, auch wenn die Messung beliebig genau wäre, wenn alle Abstände
122 berücksichtigt werden, dann wird das Gerät, das sich relativ zur Bahn bewegt immer eine kürzere Länge
123 messen. Was sagst du dazu?
124 S10: Ähm, also, ich hätt' jetzt nicht, also ich wär' jetzt nicht drauf gekommen, dass es kürzer is', aber ich
125 ... versteh' schon, dass das unterschiedlich is und nicht beide Geräte das Gleiche anzeigen.
126 B: Und was wäre deiner Meinung nach die Ursache?
127 S10: Ähm, Bewegung generell.
128 B: Und gäbe es da jetzt objektiv betrachtet einen richtigen und einen falschen Wert?
129 S10: Ähm, ich glaub' ... das was, wo das Messgerät wirklich mit dieser Bowlingbahn sich auf einem Raum-

130 schiff befindet.
 131 B: Mhm, das wäre ...
 132 S10: Richtig.
 133 B: Ok.
 134 S10: Oder genauer.
 135 B: Ok. Gut, jetzt betrachten wir ein Raumschiff, dass sich relativ zur Erde mit 100.000 km/s bewegt ...
 136 und auf der Erde und auf dem Raumschiff gibt es wieder Messgeräte die Längen exakt bestimmen. Auf
 137 der Erde befindet sich eine Bowlingbahn und das Gerät auf der ... Erde misst für die Bowlingbahn eine
 138 Länge von 18,3 m. Welche Länge zeigt dann das Gerät auf dem Raumschiff für die Bowlingbahn an?
 139 S10: Also welche Länge das misst, das Messgerät (auf dem Raumschiff; Anm.) anzeigt?
 140 B: Also ... das (Messgerät auf dem Raumschiff; Anm.) misst wieder ... die Bowlingbahn, und ...
 141 S10: Ähm, da ... hier dieser ruhende Körper quasi unsere Erde is und sich das Raumschiff bewegt würd'
 142 ich sagen, dass es wieder da ungenau ist wo sich der Körper bewegt.
 143 B: Ok.
 144 S10: Ähm und hier, wenn es auf der Erde liegt, dann is es genauer.
 145 B: Mhm.
 146 S10: Also hier würd's 18,3 m messen und da ... wahrscheinlich irgendwas Kürzeres, oder irgendwas
 147 Längeres.
 148 B: Mhm, und wenn die Läng-, äh, wenn die Messung absolut perfekt wäre, was würde es (das Messgerät
 149 auf dem Raumschiff; Anm.) dann messen, für diese Länge?
 150 S10: Genauso 18,3 ...
 151 B: Mhm.
 152 S10: ... Meter(?.)
 153 B: Und, äh, würdest du sagen man könnte in dieser Situation auch das Raumschiff als ruhend betrachten
 154 und die Erde als bewegt?
 155 S10: Ähm, könnte man glaub' ich schon, es ... hängt aber davon ab wo sich diese Bowlingbahn befindet
 156 dann(?.) Also wenn wir jetzt draufschauen wie lang das is ...
 157 B: Mhm.
 158 S10: ... und zum Beispiel das (die Bowlingbahn; Anm.) da drauf (auf dem Raumschiff; Anm.) liegt, dann
 159 könnten wir auch sagen, dass das (Raumschiff; Anm.) unser ruhender Körper is ...
 160 B: Mhm.
 161 S10: ... und sich die Erde bewegt(?.) ... ich glaub' es is grundsätzlich egal, also es können beide ruhend,
 162 oder eben bewegte Körper sein, das hängt nur ... davon ab wo ... man sich befindet.
 163 B: Mhm. Genau, tatsächlich ergibt sich, dass ... auch bei perfekter Messung das Gerät auf dem Raumschiff
 164 eine kürzere Länge bestimmen wird. Was sagst du dazu?
 165 S10: Ja eben, dass es halt, falls es sich bewegt, ähm, jetzt eben relativ zu ... dieser Erde, dass es halt dann
 166 ... eine ... nicht so genaue Länge anzeigt.
 167 B: Ok.

Interview 11:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A ...
 2 S11: Mhm.
 3 B: ... und du siehst, dass sich Raumschiff B relativ zu Raumschiff A bewegt. Kannst du irgendwie fest-
 4 stellen, ob sich wirklich B bewegt, oder vielleicht doch A, oder sogar beide?
 5 S11: Nein, das kommt aus ... der Sicht an.
 6 B: Mhm.
 7 S11: Raumschiff A kann auch annehmen, dass es sich nicht bewegt und für sich bewegt, oder umgekehrt.
 8 B: Und würdest du sagen von außen gibt's die irgendwie eine Sicht, dass man dort dann feststellen könnte
 9 wer sich bewegt?
 10 S11: Also, du meinst, wenn wir jetzt auf der Ort, ah, Erde sind, zum Beispiel, und die Erde sieht sich auch
 11 selbst als ruhend an und ... von außen ...

12 B: Irgendeine Sicht von außerhalb der beiden Raumschiffe, wo man reinschauen könnte, könnte man sowas
13 machen und dann feststellen wer sich bewegt und wer nicht?
14 S11: Naja, es in welchem Relation das ... man is außerhalb. Wenn man ... im gleichen ... nein, eigentlich
15 nicht, weil, man kann ja auch nicht sagen, wenn man außen steht, ... dass man ... sich nicht bewegt.
16 B: Ok.
17 S11: Also, wenn ich zum Beispiel ... kann ich jetzt ein Beispiel bringen?
18 B: Ja gerne.
19 S11: Weil, ich wusste, dass das, äh, jetzt schlimmer wird als, äh, das vorige Mal, aber halt, wenn ich jetzt
20 auf der Erde bin ... (lacht) ... und, äh, sagen wir ... ich sehe, dass Raumschiff A sich nicht bewegt, aber
21 Raumschiff B sich bewegt, kann ich ja trotzdem nicht annehmen, dass sich Raumschiff A ... wirklich nicht
22 bewegt, weil, die Erde bewegt sich ja auch, es bewegt sich beides.
23 B: Ok.
24 S11: Es is, äh ...
25 B: Ok.
26 S11: Ja.
27 B: Also geht's nur um die Relativgeschwindigkeit.
28 S11: Ja, genau, es geht nur um die Relation.
29 B: Und auf beiden Raumschiffen befinden sich jetzt ... Messgeräte die Geschwindigkeiten von Objekten,
30 relativ zu sich selbst, exakt bestimmen können. Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit
31 100.000 km/s und auf Raumschiff B sitzt ein Passagier.
32 S11: Mhm.
33 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?
34 S11: Also Raumschiff B bewegt sich mit 100.000 Kilometern ...
35 B: Relativ zu Raumschiff A, ja.
36 S11: Ja, dann also, wenn Raumschiff B sieht aus seiner Sicht, dass es 100.000 Kilometer ... fährt.
37 B: Mhm und das ... Gerät befindet sich ja im gleichen Raumschiff wie der sitzende Passagier und es misst
38 ja die Bewegung des Passagiers relativ zum Messgerät. ... welchen Wert würde es dann Anzeigen für die
39 Geschwindigkeit des Passagiers?
40 S11: Also wir haben ein Messgerät auf einem Raumschiff, das sich mit 100.000 Kilometern bewegt und es
41 will den Wert messen ... es will den Wert messen relativ zu was?
42 B: Eines ... sitzenden Passagiers, relativ zum Messgerät.
43 S11: Ach so, naja, er muss ja nochmal hinschauen, also ... aber das is so klein, dass es eh egal is.
44 B: Ja, sie befinden sich im gleichen Raumschiff, wie ... bewegt sich dann der Passagier relativ zum Mess-
45 gerät?
46 S11: Oh mein Gott, das is dasselbe mit dem Zug, das wir in der Schule gemacht haben. Ähm ... äh, also
47 das Messgerät, wir wollen, nein wir wollen nicht die Länge abmessen, wir wollen eh die Geschwindigkeit
48 abmessen ...
49 B: Ja.
50 S11: ... äh, ich verwechsel wieder alles, (lacht) war ja eh klar. Also aus meiner Sicht würde das Messgerät
51 jetzt sagen, dass das Raumschiff B ...
52 B: Ja (unverständlich) der Passagier.
53 S11: Der Passagier bewegt sich aber, er sitzt ja einfach im Raumschiff B, oder?
54 B: Ja.
55 S11: dann is er ja wie ein Teil des Raumschiffs B ...
56 B: Genau.
57 S11: ... weil er nicht beschleunigt wird.
58 B: Und für so einen Teil würde das Gerät was anzeigen?
59 S11: Weil das Gerät befindet sich auf dem Raumschiff.(?)
60 B: Mhm.
61 S11: Ja dann 0 km/h.
62 B: Ok, und das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier anzeigen?

63 S11: Sagen, wir nehmen jetzt an, dass Raumschiff A sich nicht bewegt ...
64 B: In dem Fall ...
65 S11: ... aus ..., aus dem Sicht des Raumschiff A bewegt sich Raumschiff B zu, mit 100.000 Kilometern
66 daran vorbei.
67 B: Und der Passagier?
68 S11: Auch 100.000 Kilometer.
69 B: Mhm.
70 S11: Weil es ja sitzt.
71 B: Und der Passagier ... geht jetzt gemütlich richtung Spitze von Raumschiff B ...
72 S11: Mhm.
73 B: ... welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff B für den ... gehenden Passagier?
74 S11: Keine 5 km/h.
75 B: Mhm, und das Gerät auf Raumschiff A?
76 S11: Äh, 105.000, also nein, 100.005, so.
77 B: Ok.
78 S11: Für den Passagier, oder für das Raumschiff?
79 B: Für den Passagier ... ja.
80 S11: Ja.
81 B: Jetzt ersetzen wir den Passagier durch eine Lampe (auf Raumschiff B; Anm.) ...
82 S11: Ja.
83 B: ... die Lichtgeschwindigkeit sind 300.000 km/s ...
84 S11: Mhm.
85 B: ... und sie leuchtet in richtung Spitze von Raumschiff B.
86 S11: Ja.
87 B: Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für das Licht?
88 S11: 300.000 Kilometer.
89 B: Und das auf Raumschiff A?
90 S11: 300.000 Kilometer.
91 B: Und wenn sich die ... Lampe auf Raumschiff A befindet und in Richtung Heck leuchtet, was messen
92 die Geräte dann das Licht?
93 S11: Also, ... das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) misst 300.000, das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.)
94 misst 300.000.
95 B: Wie viel? Ich hab's nicht verstanden.
96 S11: (Das Gerät auf A misst; Anm.) 300.000, das Licht is immer konstant.
97 B: Ok, und das hier (Gerät auf Raumschiff B; Anm.)?
98 S11: Auch 300.000.
99 B: Auch, ok.
100 S11: Wenn, weil wenn, wenn das, wenn man schneller als Lichtgeschwindigkeit, wenn man das ja addieren
101 würde, würd' es ja überhaupt keinen Sinn ergeben, weil, wenn wir dann ... wir sehen ja auch nur mit
102 Lichtgeschwindigkeit ...
103 B: Mhm.
104 S11: Das heißt wir, wenn, es is ja auch alles was wir, alles was passiert ... wird ja reflektiert zu unserem
105 Auge, das heißt, wenn etw-, wir sehen alles mit dieser 300.000 Kilometer Verzögerung ...
106 B: Mhm.
107 S11: ... und wenn wir schneller als das sind, dann fahren wir ja ... dann sehen wir uns ja selber nicht
108 mehr im Prinzip, weil wir schneller als das is was wir wahrnehmen können ...
109 B: Mhm.
110 S11: ... das heißt wir können eigentlich, wir sind, für uns is, gibt's keine Zeit.
111 B: Mhm.
112 S11: Wir können in die Zeit zurückreisen, oder davor ...
113 B: Mhm.

114 S11: ... also, es mu-, Lichtgeschwindigkeit muss immer 300.000 Kilometer sein, aus Sicht eines beruhig-,
 115 ruhigen Systems.
 116 B: Und ... der (Messgerät auf Raumschiff B; Anm.) bewegt sich jetzt aber relativ zum Licht ...
 117 S11: Ja, ... naja, es is ja wurscht, weil ... Lichtgeschwind-, der (das Messgerät auf Raumschiff A; Anm.)
 118 is ruhig und ... ach so, er bewegt sich relativ zum Licht?
 119 B: Zur Lichtquelle und ... und damit ...
 120 S11: Ja, is trotzdem 300.000.
 121 B: Also sagst du, die Relativbewegung hat keinen Einfluss auf die Lichtgeschwindigkeit, die gemessen wird.
 122 S11: Äh, wir haben jetzt ... nein s-, eh, also Lichtgeschwindigkeit is immer konstant.
 123 B: Ok.
 124 S11: (lacht) Ob das jetzt wirklich stimmt, mal schauen. (lacht)
 125 B: Jetzt haben wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die exakt bestimmen, ob Ereignisse gleichzeitig
 126 stattfinden ...
 127 S11: Mhm.
 128 B: ... und Raumschiff A bewegt sich relativ zu Raumschiff B mit 100.000 km/s.
 129 S11: Mhm.
 130 B: Das Gerät auf Raumschiff B misst, dass die Fernseher, F1 und F2 auf Raumschiff B, gleichzeitig einge-
 131 schaltet werden.
 132 S11: Ja.
 133 B: Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?
 134 S11: Wird das mit Licht ... übertragen?
 135 B: Die Messung an sich ist nicht wichtig, weil Effekte ...
 136 S11: Ja, nein, es is aber nicht das ... Zeitverhältnis ...
 137 B: ... werden einberechnet.
 138 S11: ... der k-Faktor, im Sinne, also der, der k-Faktor hier, äh, merkbar is, weil wir ein Drittel der Licht-
 139 geschwindigkeit fahren, also 33 Prozent ...
 140 B: Mhm.
 141 S11: ... da spüren wir schon einen Unterschied in der Zeit ...
 142 B: Mhm.
 143 S11: ... und sie hier, wenn ich, ich kann's mir leichter mit Lichtstrahlen vorstellen ...
 144 B: Ja.
 145 S11: ... ähm hier ein Lichtstrahl, hier ... also der Weg von dem hier is kürzer als von dem ...
 146 B: Mhm.
 147 S11: ... von F1 ...
 148 B: Äh, wenn wir ...
 149 S11: (unverständlich)
 150 B: ... wenn wir das Gerät in die Mitte stellen würden?
 151 S11: Ähm ... dann würd' es gleichzeit- ... wenn wir das Gerät in die Mitte stellen würden ...
 152 B: Kann man ja machen. ... es liegt dann da in der Mitte.
 153 S11: ... es ist dann gleichzeitig. ... äh, das is dasselbe mit dem Blitz, wenn man sich's vorstellen kann ...
 154 B: Mhm.
 155 S11: Wenn man den da sieht und da ein Blitz einschlägt und da ...
 156 B: Mhm.
 157 S11: und da ein (unverständlich) is so, ... is derselbe Abstand, sollte es dann gleichzeitig passieren ...
 158 B: Ok, weil, wir könnten ja auch den Abstand einfach einrechnen und dann hätten wir ja ... die Situation
 159 ja erzeugt.
 160 S11: Nein, es bewegt sich. Es kann ... nein, der Raumschiff A bewegt sich, es is nicht gleichzeitig.
 161 B: Auch wenn's (das Messgerät) in der Mitte stehen würde?
 162 S11: Ja.
 163 B: Ok. Jetzt noch zwei Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff B ...
 164 S11: Ja.

165 S11: ... und das Gerät auf Raumschiff A misst, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann
166 das Gerät auf Raumschiff B an?
167 S11: (lacht), äh, nochmal kurz (lacht)
168 B: Jetzt misst das Gerät auf Raumschiff A, dass F3 und F4 gleichzeitig eingeschaltet werden ...
169 S11: Mhm.
170 B: ... was stellt dann das Gerät auf Raumschiff B fest?
171 S11: Ähm, F3 wird ...
172 B: Auch wenn's in der Mitte stehen würde, kann man sich wieder vorstellen.
173 S11: F3 wird zuerst vorge-, äh, F3 zu-, zuerst eingeschalten und dann F4.
174 B: Und warum?
175 S11: Weil hier das ... Signal, also, wenn ich's mir wieder mit dem Licht vorstell', man kann sich's auch
176 über die Zeit vorstellen, für mich ist das komplizierter, ähm, einfach, sozusagen mit diesen, diesen Pendel-
177 lichtuhren. Ich hab, äh, ich wechsel mich ab mit der Vorstellung, aber grad stell ich mir das einfach so vor,
178 ähm, das eben F3 ... ah, einen läng-, äh, kürzeren Weg ...
179 B: Äh, wir könnten ja wieder beide (Messgeräte; Anm.) jeweils in die Mitte stellen ...
180 S11: Ja.
181 B: Und dann wird das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) ja immer noch anzeigen, die werden gleichzeitig
182 eingeschaltet ...
183 S11: Mhm.
184 B: ... was würde dann das Gerät hier (auf Raumschiff B; Anm.) anzeigen?
185 S11: Wenn das Gerät (auf Raumschiff B; Anm.) hier (gleich weit von beiden Fernsehern entfernt) steht?
186 B: Ja.
187 S11: Das Gerät (auf Raumschiff B; Anm.) steht hier, ähm, das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) zeigt an es
188 is gleichzeitig, ... wenn das hier (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) gleichzeitig is, dann is irgendwas falsch.
189 Weil das, das (Gerät auf Raumschiff B; Anm.) steht auch hier (gleich weit von beiden Fernsehern entfernt;
190 Anm.)?
191 B: Ja wir könnten das ja auch in die Mitte, sodass die Wege (von beiden Fernsehern zum Messgerät; Anm.)
192 gleich lang sind stellen.
193 S11: Nein es wird noch immer ... es wird, F3 wird noch immer zuerst eingeschaltet werden.
194 B: Mhm. Auch wenn der Abstand gleich wäre?
195 S11: Ja.
196 B: Und warum wäre das so?
197 S11: Hm, weil wir ja wieder die Verschiebung haben.
198 B: Welche Verschiebung?
199 S11: Naja, das hier (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) wird beschleunigt ...
200 B: Naja es beschl-, wird nicht beschleunigt.
201 S11: ... also nicht, äh, beschleunigt, es, es bewegt sich ...
202 B: Ja.
203 S11: ... ähm, das heißt wir haben, haben, hier diese, eben diese Verschiebung ...
204 B: Mhm.
205 S11: ... von ... ich, ich sag jetzt nicht mit Licht, weil wenn ich's mir so opt-, visuell vorstell', dann kann
206 man natürlich auch sagen man stellt das Ding (Messgerät; Anm.) in die Mitte ...
207 B: Ja.
208 S11: Aber hier, hier wird ja die Zeit verschoben ...
209 B: Mhm.
210 S11: ... äh, ... und die Zeit is verschoben, das hier zeigt nicht die ... ja.
211 B: Und sind sie dann jetzt gleichzeitig eingeschaltet worden, oder nicht?
212 S11: Nein.
213 B: Aber das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.) sagt ja sie sind gleichzeitig eingeschaltet worden.
214 S11: Ja aber es is aber die Verschiebung.
215 B: Mhm. Ok, also würdest du sagen, dass dieser Messwert (das Gerät auf Raumschiff A; Anm.) eigentlich

216 falsch wäre.

217 S11: Aus dem Sicht dieses Systems (des Raumschiffs B; Anm.) ja.

218 B: Und aus Sicht dieses Systems (des Raumschiffs A; Anm.)?

219 S11: Nein.

220 B: Das heißt der (das Gerät auf Raumschiff A; Anm.) könnte sagen sind gleichzeitig eingeschaltet worden

221 und der (das Gerät auf Raumschiff B; Anm.) nicht ...

222 S11: Ja.

223 B: ... und hätten beide recht, oder hätte jemand unrecht?

224 S11: Es hätten ... beide recht aus ihrer Sicht.

225 B: Ok. Wir haben jetzt zwei Raumschiffe ...

226 S11: (lacht) war das falsch?

227 B: Das passt schon.

228 S11: (unverständlich) wir müssen schon eine Auflösung dann machen ...

229 B: kommt am Ende.

230 S11: Ok ... (lacht)

231 B: Auf beiden Raumschiffen gibt es Messgeräte die Längen exakt bestimmen können.

232 S11: Ja.

233 B: Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s ...

234 S11: Mhm.

235 B: ... und auf Raumschiff B befindet sich eine Bowlingbahn.

236 S11: Ja.

237 B: Das Gerät auf B misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m.

238 S11: Mhm.

239 B: Welche Länge stellt dann das Gerät auf Raumschiff A fest?

240 S11: Keine Ahnung, 14(?) 14 Meter, 16 Meter ...

241 B: So, länger kürzer ...

242 S11: Ja, kürzer.

243 B: ... das reicht völlig. Ok, und wenn sich die Bahn auf Raumschiff A befindet und das Gerät auf Raum-

244 schiff eine Länge von 18,3 m misst für die Bowlingbahn ...

245 S11: Dann wird sie länger.

246 B: ... was stellt dann das Gerät auf Raumschiff B für diese Länge fest?

247 S11: Sie sollt' länger werden.

248 B: Ok.

249 S11: Aus Sicht ... warten ähm, ... es ist glei-, nein es muss länger werden, weil, B nimmt an es wir-, es

250 ist gleich, es is gleich groß ...

251 B: Ok.

252 S11: ... das heißt die, seine Umwelt wird klein-, äh, größer, so.

253 B: Ok. Tatsächlich ergibt sich, dass das Gerät, das sich relativ zur Bahn bewegt, also hier (bei Frage 8;

254 Anm.) das auf Raumschiff A und hier (bei Frage 9; Anm.) das auf Raumschiff B ...

255 S11: Mhm.

256 B: ... immer eine kürzere Länge misst ...

257 S11: Auch eine kürzere?!

258 B: ... als das relativ zur Bahn ruhende.

259 S11: Das was sich bewegt misst die kürzere Länge(?)

260 B: Mhm.

261 S11: Das heißt ... warten ... sehr interessant (lacht). Hallo. Ähm ... das hier (Gerät auf Raumschiff B;

262 Anm.) misst eine kürzere ...

263 B: Genau.

264 S11: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ok, das heißt ich hab's genau umgekehrt eigentlich gesagt, bei

265 beiden ...

266 B: In dem Fall (wenn sich die Bahn auf A befindet; Anm.) aber nur, weil, hier (wenn sich die Bahn auf B

267 befindet; Anm.), misst das Gerät auf Raumschiff A, das bewegt sich ja relativ zur Bahn ...
 268 S11: Jaja.
 269 B: ... bzw. die Bahn relativ zum Gerät, das misst was Kürzeres, das hast du auch gesagt. Hier (wenn sich
 270 die Bahn auf A befindet; Anm.) bewegt sich das Gerät auf Raumschiff B relativ zur Bahn, also misst das
 271 was Kürzeres.
 272 S11: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja macht Sinn.
 273 B: Ok.
 274 S11: Das is, das (Gerät auf Raumschiff A; Anm.) is in der, im ruhenden System und das hier (Gerät auf
 275 Raumschiff B; Anm.) bewegt sich schneller, das heißt es misst es kürzer, ja es ergibt Sinn.
 276 B: Ok. Und, welcher der Werte stimmt jetzt, wie lange is die Bowlingbahn tatsächlich?
 277 S11: Also, kann man nicht sagen. ... also, das hier (Raumschiff A; Anm.) is das ruhende System aus seiner
 278 Sicht, also ...
 279 B: Mhm.
 280 S11: ... kann man annehmen, äh, dass es das, aber das hier, es ist kein Richtig, oder Falsch ...
 281 B: Ok.
 282 S11: ... denn das System könnte sich auch bewegen ...
 283 B: Ja.
 284 S11: ... im System Raumschiff A.
 285 B: Jetzt noch auf der Erde und auf einem relativ dazu mit 100.000 km/s bewegten Raumschiff ...
 286 S11: Ja.
 287 B: ... wieder Messgeräte die Längen exakt bestimmen und auf der Erde eine Bowlingbahn.
 288 S11: Mhm.
 289 B: Das Gerät auf der Erde misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m, welche Länge misst dann
 290 das Gerät auf dem Raumschiff für die Bowlingbahn?
 291 S11: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... sie muss kleiner werden.
 292 B: Ok, und was wär' da der richtige, oder falsche Wert?
 293 S11: Kann man nicht sagen.
 294 B: Gibt's prinzipiell einen richtigen, oder falschen Wert?
 295 S11: Für uns, für uns auf der Erde is natürlich der Erd-, äh, die Erde immer der richtige Wert ...
 296 B: Mhm.
 297 S11: ... unter Anführungszeichen, weil's einfach viel einfacher is für uns vorzustellen, die Erde is ... bleibt,
 298 aber die Erde bewegt, kreist ja auch um die Sonne, die Sonne kreist ja um whatever, irgendeinen andern
 299 Stern und der andere Stern kreist um den Mittel der Univer-, um den Mittelpunkt des Universums. Wir
 300 können nicht sagen, es is ja nichts in, in Ruhe eigentlich, und es gibt kein ruhendes System. Jetzt, für
 301 Vereinfachungszwecke werden wir wahrscheinlich sagen die Erde is das richtige System, oder die richtige
 302 Länge, aber ...
 303 B: Und könnten wir theoretisch sagen das Raumschiff ruht und die be-, Erde bewegt sich mit 100.000 ...
 304 S11: Ja, das kann man auch sagen.
 305 B: Könnte man, ok.
 306 S11: Ja.
 307 B: Und du würdest generell sagen dann haben, dann sind beide Werte prinzipiell richtig.(?)
 308 S11: Ja richtig aus, aus Sicht des jeweiligen Systems.
 309 B: Ok.

Interview 12:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B und du befindest dich auf Raumschiff A. Du siehst, dass
 2 sich Raumschiff B, relativ zu dir, bewegt. Hast du irgendeine Möglichkeit festzustellen, ob sich wirklich
 3 Raumschiff B bewegt, oder doch A, oder vielleicht sogar beide?
 4 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... mmm, nein.
 5 B: Mhm.
 6 S12: Ähm, ... da ich mich, wenn ich mich in einem ruhenden ... Zustand befinde und ich kann nicht ganz

7 sicher sein, ob ich mich in Ruhe, oder ... sich der andere Körper bewegt.
8 B: Mhm. Und würdest du sagen, dass es vielleicht von außen eine Perspektive gibt, die das entscheiden
9 könnte?
10 S12: ... mmm, ja, ich denk' schon, wenn man im ... gleichen Abstand zu beiden ... Raumschiffen ...
11 steht, ... bzw. von oben runterschaut, dass man sehen kann ..., ob sie sich bewegen, oder nicht, aber
12 vielleicht nicht, welches sich bewegt, wenn sie sich im ... Weltraum befinden.
13 B: Mhm. Und der könnte aber auf jeden Fall feststellen, ob was ruht, oder nicht(?) ... so ein ... äußerer
14 Beobachter.
15 S12: Mmm, ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... wenn sich der Beobachter ... im Ruhestand befindet denk'
16 ich schon, ja.
17 B: Mhm, ok. Für die Situation, dass wir auf einem der Raumschiffe sind, is aber, wie gesagt, nur die Rela-
18 tivbewegung von Bedeutung, sonst ... nichts. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte,
19 die Geschwindigkeiten exakt bestimmen können ... und Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raumschiff
20 A mit 100.000 km/s. Auf Raumschiff B sitzt ein Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf
21 Raumschiff B ... für den Passagier?
22 S12: ... in welchem, B bewegt sich mit Hundert- ...
23 B: B bewegt sich, relativ zu A, mit 100.000 km/s. Das Messgerät auf Raumschiff B und der sitzende
24 Passagier sind am gleichen Raumschiff. Welche ... Geschwindigkeit misst das Gerät (auf Raumschiff B;
25 Anm.) für den Passagier?
26 S12: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... für den Paschassie-, Pa-, Pa-, (unverständlich), Passagier selbst ...
27 keine Geschwindigkeit ...
28 B: Mhm.
29 S12: ..., ähm, ... da er sich selbst nicht bewegt, sondern sich das Raumschiff bewegt.
30 B: Und ... das Gerät auf Raumschiff A, was würde das für den Passagier messen?
31 S12: Ähm, ... die Geschwindigkeit von Raumschiff B(?)
32 B: Ok. Jetzt steht der Passagier ... auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B. Welche Geschwin-
33 digkeit misst jetzt das Gerät auf Raumschiff B für ihn?
34 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ..., äh, die Geschwindigkeit in der er sich vorbe-, ... fortbewegt(?)
35 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?
36 S12: Misst, ähm, ... die Geschwindigkeit vom Passagier plus die Geschwindigkeit von Raumschiff B(?)
37 B: Ok. Jetzt ersetzen wir den Passagier durch eine Lampe ... die auf Raumschiff B steht und in Richtung
38 Spitze von Raumschiff B leuchtet. Die Lichtgeschwindigkeit sind ungefähr ... 300.000 km/s. Welche Ge-
39 schwindigkeit zeigt das Gerät auf Raumschiff B für das Licht an?
40 S12: 300.000 Kilo-, äh, ja, 300.000 Kilometer pro ... Stunde ... Sekunde(?)
41 B: Sekunde. Und welche Geschwindigkeit zeigt das Gerät auf Raumschiff A für das Licht an?
42 S12: ... ähm, die Geschwindigkeit des Lichts plus die Geschwindigkeit von ... Raumschiff B?
43 B: Ok. Wir platzieren die Lampe jetzt auf Raumschiff A und sie leuchtet in Richtung Heck von Raumschiff
44 A. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?
45 S12: ... die ... Lichtgeschwindigkeit(?)
46 B: Und das Gerät auf Raumschiff B?
47 S12: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... langsamer, als die Lichtgeschwindigkeit ..., da es sich in die gleiche,
48 äh, Richtung bewegt, wie ... das Licht ausgestrahlt wird(?)
49 B: Ok. Tatsächlich ergibt sich, dass in ... beiden Situationen jedes der Messgeräte genau 300.000 km/s
50 misst, für das Licht. Was sagst du dazu?
51 S12: Mhm, ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... das Messgerät ... das sich beim Licht befindet ... misst
52 bei beiden, oder ...
53 B: Jedes. Hier (wenn sich die Lampe auf A befindet; Anm.) ...
54 S12: Jedes.
55 B: ... zum Beispiel ... das auf Raumschiff A und das auf Raumschiff B, beide bestimmen 300.000 km/s
56 für's Licht.
57 S12: Mhm, also ich weiß, dass ... Lichtgeschwindigkeit ein konstant-, eine konstante Geschwindigkeit is

58 ...

59 B: Mhm.

60 S12: ..., aber ... ich kann mir nicht ganz erklären, wieso, deshalb ...

61 B: Mhm.

62 S12: ... es ergibt, es ergibt für mich keinen Sinn, aber es ... is so ... ja. (lacht)

63 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die exakt bestimmen, ob Ereignisse

64 gleichzeitig stattfinden, oder nicht. Raumschiff A bewegt sich, relativ zu Raumschiff B, mit 100.000 km/s

65 und auf Raumschiff B stehen zwei Fernseher, F1 und F2. Dass Gerät auf Raumschiff B misst, dass beide

66 gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?

67 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass zuerst F2 eingeschalten wird?

68 B: Und warum wäre das so?

69 S12: Ähm, ... weil es zuerst an F2 vorbeifliegt.(?)

70 B: Mhm. Was, wenn die Messgeräte ihre Positionen ..., ihre Abstände von den Fernsehern und die Licht-

71 laufzeit ... einrechnen ... die Daten über einen längeren Zeitraum hinweg sammeln und dann auswerten?

72 Was würde das Gerät auf Raumschiff A dann anzeigen?

73 S12: Dass sich beide gleichzeitig einschalten.(?)

74 B: Ok. Jetzt betrachten wir zwei Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff B und das Gerät auf Raumschiff A

75 stellt fest, dass beide gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B an?

76 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... mmm, ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass ... F ... drei

77 schneller, nein ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ..., mhm (lacht), ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass

78 F4 sich schneller einschaltet?

79 B: Und warum wäre das so?

80 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., ahm, ... da aus Sichtpunkt von A ... es (das Messgerät auf

81 Raumschiff A; Anm.) zuerst an F4 und an F3 vorbeikommt und wenn sie (unverständlich), wobei, wenn

82 sich zuerst F4 einschaltet ... es danach erst sieht, wann ich F3 einschaltet, das heißt, es weiß nicht, ob F3

83 davor schon eingeschalten war, oder nicht.

84 B: Mhm. Was wäre, wenn die Messgeräte wieder die Daten über einen Zeitraum sammeln, dann auswerten

85 und die ... Positionen und Abstände berücksichtigen?

86 S12: ..., ähm, ... dann würden sie ... herausfinden, dass F ..., dass sich die beiden Fernseher ... zu

87 unterschiedlichen Zeitpunkten einschalten?

88 B: Mhm. Wie gesagt, das Gerät auf Raumschiff A zeigt, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was

89 würde, unter der Voraussetzung, dass man ... die ganzen Abstände berücksichtigt, dann das Gerät auf B

90 ... anzeigen?

91 S12: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ..., dass sie sich unterschiedlich einschalten?

92 B: Und warum?

93 S12: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ..., weil, weil A nicht weiß ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ..., ob das

94 ..., ob der andere Fernseher schon eingeschalten war, bevor es am ersten Fernseher vorbeifliegt.

95 B: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... mmm, ok. Tatsächliche Messungen ergeben, auch wenn die Messgeräte

96 immer ... die ganzen Informationen haben, wenn sie die Abstände kennen, die Lichtlaufzeit berücksichtigen,

97 oder auch wer wo zuerst vorbeikommt, dann wird sich trotzdem ergeben, dass wenn ... ein Gerät anzeigt,

98 dass sie (die Fernseher; Anm.) gleichzeitig eingeschaltet werden, das andere ... immer anzeigt, dass sie

99 nicht gleichzeitig eingeschaltet werden. Was sagst du dazu?

100 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ..., ähm, ja, also ..., irgendwie verbind' ich das Ganze mit Perspektive

101 ...

102 B: Mhm.

103 S12: ..., weil, ... wenn ich etwas nicht sehe, weiß ich auch nicht ..., ob ... es jetzt eingeschalten is, oder

104 nicht und das is bei A ja der Fall, weil da ... si-, sich zuerst nicht sicher is, bzw. zuerst nicht weiß, ob das

105 andere Gerät eingeschalten is, oder nicht.

106 B: Mhm.

107 S12: Deshalb ... ja, versteh' ich. Würd' ..., würd' Sinn ergeben.

108 B: Ok. Und, äh, welches der beiden Geräte, würdest du sagen, misst da richtig?

109 S12: Mmm, ich glaub' ... da ... gibt es kein Richtig, oder Falsch, weil es eben darauf ankommt, auf
110 welchem ... Raumschiff man sich befindet ... und ... das ist ... einfach eine andere Messung, also keine
111 Messung ist falsch.

112 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Längen exakt bestimmen können.
113 Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raumschiff A, mit 100.000 km/s ... und auf Raumschiff B gibt es
114 eine Bowlingbahn. Das Gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn eine Länge von 18,3 m. Welche
115 Länge zeigt das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn an?

116 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... eine ..., eine kürzere Länge.

117 B: Mhm.

118 S12: Oder, na ..., nein, nein, nein ... hm, eine längere Länge, weil ... die ... Bowlingbahn ... für den
119 ganzen ..., für die ganze Länge des Raumschiffs A ... sichtbar ist ...

120 B: Mhm.

121 S12: ..., sozusagen.

122 B: Ok. Was, wenn sich die Bowlingbahn auf Raumschiff A befindet und das Gerät auf Raumschiff A für
123 diese eine Länge von 18,3 m anzeigt? Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B für diese Länge an?

124 S12: ... (11 Sekunden Pause; Anm.) ... eine Länge von ... 18,3 m, weil ... sich A im Ruhestand befindet
125 und ... B ... eben die ... korrekte ... Länge der Bowlingbahn ... messen könnte?

126 B: Ok.

127 S12: (lacht)

128 B: Mhm. Und, äh, wie würdest du genau sagen kommt es hier (wenn sich die Bahn auf B befindet; Anm.)
129 dann dazu, dass das Gerät auf A eine ... längere Länge für die Bahn misst?

130 S12: ..., ähm, ... da sich die Bahn ... die ganze Zeit in Sicht- ... -feld von A befindet ...

131 B: Mhm.

132 S12: ... während es, während B vorbeifliegt.

133 B: Ok. Mhm, ... also, das klingt so, als würdest du über einen optischen Effekt reden.

134 S12: Mmm, mhm.

135 B: Ok. Ähm, ... tatsächlich ergibt sich, auch, wenn optische Effekte berücksichtigt werden, das kann man
136 auch alles ... schön miteinbeziehen ..., dass immer das Messgerät, das sich relativ zur Bahn bewegt, hier
137 (wenn sich die Bahn auf B befindet; Anm.) also das Gerät auf Raumschiff A, hier (wenn sich die Bahn auf
138 A befindet; Anm.) das Gerät auf Raumschiff B, eine kürzere Länge als 18,3 m misst. Was sagst du dazu?

139 S12: ..., ähm, ... (12 Sekunden Pause; Anm.) ... (lacht) ... (20 Sekunden Pause; Anm.) ... ich bin mir
140 nicht ganz sicher, wieso ... es ... bei beiden Messungen kürzer ist ... weil es ..., für mich eben durch
141 dieses Optische mehr Sinn ergeben würde, dass es beim einen längeren ist ...

142 B: Mhm.

143 S12: ... aber, ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub', ich würd's auch nicht weiter hinterfragen.
144 (lacht)

145 B: Ok. Und ... gibt es bei diesen beiden verschiedenen Ergebnissen, weil ja das hier, das Gerät auf Raum-
146 schiff B eine kürzere Länge misst dann einen richtigen und einen falschen Wert?

147 S12: ... mmm, nein, ich glaub' das ist ... so wie ... bei den Zeitpunkten ...

148 B: Mhm.

149 S12: ..., dass es ... einfach ... verschiedene Messungen sind ... und es auch darauf ankommt in ...
150 welcher Perspektive man sich gerade befindet.

151 B: Mhm. Meinst du mit Perspektive jetzt ...

152 S12: Also ..., ja, welches Raumschiff, auf welch-, also ..., die Messung von welchem Raumschiff jetzt ...
153 auf welchem man, auf welchem Raumschiff man sich befindet.

154 B: Also, du würdest meinen die Wahl des Bezugssystems, aber ...

155 S12: Ja.

156 B: ..., jetzt nicht irgendwie die optische Perspektive.

157 S12: Ja.

158 B: Ok. ... welche Länge hat dann die Bowlingbahn?

159 S12: ... hm, ... 18,3 m?

160 B: Ok. Jetzt betrachten wir noch ein ... Raumschiff, das sich, relativ zur Erde, mit 100.000 km/s bewegt
 161 und auf dem Raumschiff und auf der Erde gibt es Messgeräte die Längen exakt bestimmen. Auf der Erde
 162 gibt es eine Bowlingbahn und das Gerät auf der Erde misst für diese eine Länge von 18,3 m. Welche Länge
 163 zeigt dann das Gerät auf dem Raumschiff ... für die Bowlingbahn an?
 164 S12: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... eine kürzere Länge? (lacht)
 165 B: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ..., weil?
 166 S12: Ähm, ... weil ... Sie mir vorher gesagt haben, dass es eine kürzere Länge is. (lacht)
 167 B: Ok. Was würdest du denn sonst sagen?
 168 S12: Ich ... hätte gesagt, dass es ... die gleiche Länge wäre ...
 169 B: Mhm.
 170 S12: ... aber, ... ja. (lacht)
 171 B: Tatsächlich ... ergibt sich auch hier eine kürzere Länge ... auf, für das Messgerät auf dem ... Raum-
 172 schiff. Gäbe es hier jetzt einen richtigen und einen falschen Wert?
 173 S12: ... nein, glaub', also, ... glaub' ich auch nicht.
 174 B: Und welche Länge hat hier die Bowlingbahn?
 175 S12: (lacht) auch 18,3 m.
 176 B: Ok.
 177 S12: (lacht)
 178 B: Danke.

Interview 13:

1 B: Wir betrachten zwei Raumschiffe A und B. Du befindest dich auf Raumschiff A. Due siehst, dass sich
 2 Raumschiff B, relativ zu dir, bewegt.
 3 S13: Ja.
 4 B: Kannst du irgendwie feststellen, ob sich wirklich Raumschiff B bewegt, oder doch Raumschiff A, oder
 5 sogar beide?
 6 S13: Also, wirklich feststellen kann ich's nicht, weil ich kein ... Bezugssystem habe ...
 7 B: Mhm.
 8 S13: ... bzw. eine Umwelt, woran ich das festmachen könnte ...
 9 B: Mhm.
 10 S13: ... bzw., es kommt auch auf den ... Betrachter an, wo ich mich befinde ...
 11 B: Mhm.
 12 S13: ... was ich als ruhig, ruhendes und bewegtes System wahrnehm.
 13 B: Ok. Und würdest du sagen es gäbe jetzt von außen eine Perspektive, die das entscheiden könnte?
 14 S13: ... äh, ... nicht wirklich, weil, es könnte sich ja die Außenwelt, wo der Betrachter sich befindet auch
 15 selbst bewegen, oder ruhend sein, deswegen würd' ich sagen ... eher nicht. Aber wenn ich's halt ... aus
 16 dem Fixpunkt sehe kann ich halt sagen, ok, ich bin jetzt das ruhende System und ich betrachte die andern
 17 Systeme ...
 18 B: Mhm.
 19 S13: ... in Relation zu mir.
 20 B: Was würdest du als Fixpunkt meinen?
 21 S13: Aus meiner Perspektive aus gesehen.
 22 B: Ok.
 23 S13: Ja.
 24 B: Also, meinst du etwas, ... das du als fix ... wählst ...
 25 S13: Ja. Also, wenn ich jetzt, keine Ahnung, ... einen Text über das schreib', ok, ich seh das jetzt alles aus
 26 meiner Perspektive heraus.
 27 B: Mhm.
 28 S13: Ja.
 29 B: Ok, gut. Könnte jemand anderer sagen, dein Fixpunkt ... bewegt sich? ... und den quasi anzweifeln?
 30 S13: Könnte, ja. (lacht) ... aber, wenn ich, ... wenn ich mich als ruhendes System festlege, sozusagen,

31 dann nicht ...

32 B: Mhm.

33 S13: ... würd' ich, also der kann's natürlich anzweifeln, aber ...

34 B: Mhm.

35 S13: ... dann ... geht das Ganze physikalische Experiment ja davon aus, dass ich ruhend bin.

36 B: Ok. ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... wir betrachten jetzt auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die

37 Geschwindigkeiten exakt bestimmen, dabei bestimmen sie immer die Geschwindigkeit ... die ein Objekt

38 relativ zum Messgerät hat, also, ob sich was auf das Gerät zubewegt, oder davon weg und wie schnell.

39 S13: Mhm.

40 B: Raumschiff B bewegt sich relativ zu Raumschiff A mit 100.000 km/s ... und auf Raumschiff B sitzt ein

41 Passagier. Welche Geschwindigkeit misst das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?

42 S13: ... also, wie viel, wie viel, wie schnell der Passagier ist? Äh ... 0 km/h, weil er ..., weil sie im selben

43 Bezugssystem sind.

44 B: Und das Gerät auf Raumschiff A? Für den Passagier(.)?

45 S13: ... bewegt sich das (Messgerät auf Raumschiff A; Anm.)?

46 B: Naja, wir wissen nur, ... es gibt eine Relativbewegung ...

47 S13: Ok.

48 B: ... von 100.000 km/s.

49 S13: Ja, dann misst ... das Messgerät auf Raumschiff A ... die Geschwindigkeit von Raumschiff B, halt

50 ... je nachdem wie es sich, relativ zu Raumschiff A bewegt ...

51 B: Mit 100.000.

52 S13: ... mit 100.000 km/s.

53 B: Ok. Jetzt steht der Passagier auf und geht in Richtung Spitze von Raumschiff B. Welche Geschwindig-

54 keit misst dann das Gerät auf Raumschiff B für den Passagier?

55 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... so schnell wie er geht(.)?

56 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

57 S13: ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... vielleicht ... 100.000 km/s, weil er sich in dem Bezugssystem B

58 bewegt?

59 B: ... das Gerät möchte aber tatsächlich nicht die, nur vom Bezugssystem nur ...

60 S13: Ok.

61 B: ... die Geschwindigkeit messen, sondern von der Person selbst.

62 S13: ... dann ist die Geschwindigkeit, glaub' ich ... verzogen, sozusagen, weil sich halt Raumschiff B mit

63 100.000 km/s bewegt und der Passagier dazu noch geht ...

64 B: Mhm.

65 S13: ... deswegen kann man die exakte Geschwindigkeit, sozusagen, nicht feststellen vom Passagier, bzw.

66 halt nur die aus der Perspektive von Raumschiff A.

67 B: Mhm, und welche wäre das aus der Perspektive von Raumschiff A?

68 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... eben (lacht), ich glaub' ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... die

69 Gesch-, eben die Geschwindigkeit von Raumschiff B, halt ... irgendwie (lacht) ... ich weiß nicht wie ich

70 das sagen soll, ähm ...

71 B: Wär's größer als die Geschwindigkeit nur von Raumschiff B, oder kleiner?

72 S13: Ja, größer würd' ich sagen, halt addiert dazu.

73 B: Ok.

74 S13: Ja.

75 B: Und wie viel größer?

76 S13: So viel wie halt der Passagier geht.

77 B: Ok. Wir ersetzen den Passagier durch eine Lampe ... auf Raumschiff B, die in Richtung Spitze von

78 Raumschiff B leuchtet. Licht bewegt sich mit ungefähr 300.000 km/s. Welche Geschwindigkeit misst das

79 Gerät auf Raumschiff B für das Licht?

80 S13: 300.000 km/s.

81 B: Und das Gerät auf Raumschiff A?

82 S13: ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... auch 300.000 km/s, weil's, sich schneller bew-, ... hm ... (10
83 Sekunden Pause; Anm.) ... hm, ich glaub' auch 300.000 km/s, weil die Lampe ..., also, weil das Licht ...
84 eine schnellere Geschwindigkeit hat, als das Raumschiff selber, sozu-, na, ich wie-, hmm?
85 B: ... mhm. Was wäre, wenn wir ... sagen ein Zug bewegt sich mit 50 km/h an dir vorbei ...
86 S13: Mhm.
87 B: ... und ... von diesem Zug aus schießt jemand eine Gewehr- kugel, welche Ge-, Geschwindigkeit hat
88 dann die ... Gewehr- kugel, aus deiner Sicht?
89 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... die Geschwindig-, also, isch-, die Geschwindigkeit die die Gewehr-
90 kugel halt hat, sozusagen, also ...
91 B: Mhm.
92 S13: ... jetzt ... unabhängig von der Geschwindigkeit des Zuges?
93 B: Ok.
94 S13: Würd' ich sagen ... hm.
95 B: Und was, wenn der ... Zug schneller wär als die Gewehr- kugel?
96 S13: ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... dann wär die Gewehr- kugel noch immer ... gleich schnell für mich
97 ... ich wei-, ah, ...
98 B: Ok.
99 S13: ... glaub' ich. Ich weiß nicht.
100 B: Was wäre, wenn wir jetzt ... die Lampe auf Raumschiff A platzieren und sie in Richtung Heck von
101 Raumschiff A leuchtet. Welche Geschwindigkeit misst dann das Gerät auf Raumschiff A für das Licht?
102 S13: ... ähm, 300.000 km/s(?)
103 B: Und das Gerät auf Raumschiff B?
104 S13: ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... die Geschwindigkeit des Lichts minus der Geschwindigkeit von
105 Raumschiff B ...
106 B: Ok.
107 S13: ... weil ... sich Raumschiff B, sozusagen, in die ... gleiche Richtung bewegt wie das Licht ...
108 B: Mhm.
109 S13: ... und deswegen ... 200.000 km/s(?)
110 B: Ok. Also, ... würdest du das hier, quasi, subtrahieren, aber in dem Fall (wenn sich die Lampe auf
111 Raumschiff B befindet; Anm.) hättest du gesagt, dass es ... keine Auswirkung hat, ... die Relativbewe-
112 gung.
113 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ja. Aber es, ja, es macht jetzt keinen Sinn mehr, irgendwie. ...
114 also jetzt ... jetzt würd' ich vielleicht sogar sagen ... nein, ich würd' nicht sagen, dass es ne Auswirkung
115 hat ...
116 B: Mhm.
117 S13: ... weil ... man sich entgegengesetzt bewegt und sozusagen sich die Geschwindigkeit nicht aufhebt
118 ...
119 B: Mhm.
120 S13: ... weil ... weil da (wenn sich die Lampe auf Raumschiff A befindet; Anm.) bewegt sich das Licht
121 in dieselbe Richtung wie Raumschiff B, deswegen ... sieht ... das ... sieht das Licht eben ... langsamer
122 aus, aus der Perspektive von Raumschiff B, als ... aus Raumschiff A.
123 B: Ok. Tatsächliche Messungen ergeben, dass ... in beiden Situationen ... auch das relativ zur Lichtquelle
124 bewegte Messgerät, also hier (wenn sich die Lampe auf B befindet; Anm.) das Gerät auf A und hier (wenn
125 sich die Lampe auf A befindet; Anm.) das Gerät auf B, 300.000 km/s messen für das Licht. Was sagst du
126 dazu?
127 S13: Mm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... es macht irgendwie ein bisschen wenig Sinn, zumindest ... da
128 wo sie, äh, wo Raumschiff B und ... die Lichtrichtung gleich sind, ähm, weil man eben denkt, dass das
129 bewegte ... Bezugssystem ... die Geschwindigkeit anders wahrnimmt, wenn sie sich in dieselbe Richtung
130 bewegt, ... weil, ... sich das Bezugssystem eben selbst bewegt.
131 B: Mhm.
132 S13: Ja.

133 B: ... wir betrachten jetzt auf beiden Raumschiffen Messgeräte, die exakt bestimmen, ob Ereignisse gleich-
134 zeitig stattfinden, oder nicht. Raumschiff A bewegt sich, relativ zu Raumschiff B, mit 100.000 km/s. Auf
135 Raumschiff B gibt es zwei Fernseher, F1 und F2. Das Gerät auf Raumschiff B misst, dass F1 und F2
136 gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?
137 S13: Ähm, ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... das würde ..., glaub' ich, ... anzeigen, dass die ... Fernseher,
138 oder Geräte, auf Raumschiff B nicht gleichzeitig eingeschaltet werden, weil es sich eben mit einer so großen
139 Geschwindigkeit fortbewegt, ... dass, sozusagen, die ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... die Aktionen, die
140 mit den Fernsehern passieren nicht gleichzeitig stattfinden, sondern ... hintereinander wahrgenommen
141 werden ...
142 B: Mhm.
143 S13: ... weil es sich eben vorbeibewegt.
144 B: Ok. Warum werden sie da ... dann hintereinander wahr- ... -genommen, bei einer ... größeren Ge-
145 schwindigkeit?
146 S13: Ähm ... weil ... wegen der Zeitdilatation? Ich weiß nicht, haben wir das ... gelernt, ... ja wegen,
147 also, dass sich die Zeit ... in, dass die Zeit in ander-, in bewegten Bezugssystemen ... langsamer vergeht
148 als in ruhenden Bezugssystemen ...
149 B: Mhm.
150 S13: ... glaub' ich und ... für mich würd' das dann mehr Sinn machen, dass, wenn halt ... das Raumschiff
151 hier vor-, sich vorbeibewegt ...
152 B: Mhm.
153 S13: ... und Raumschiff B ruhend is, bzw., halt, ... A sich relativ zu B bewegt, dass sich die Fernseher
154 halt nicht gleichzeitig einschalten ...
155 B: Ok.
156 S13: ... weil, ja.
157 B: Und ... was würdest du dann sagen, haben sie sich dann gleichzeitig eingeschaltet, oder nicht? ... jetzt
158 haben wir ja zwei Messgeräte die was Verschiedenes sagen.
159 S13: ... mm ... es kommt eben auf, auf ... die Perspektive an, aus welchem Bezugssystem man das
160 betrachtet.
161 B: Mhm.
162 S13: Deswegen kann man kein fix ... äh, keine ... fixe Meinung ... dazu sagen, haben ... ja.
163 B: Ok. Wir betrachten noch zwei Fernseher F3 und F4 auf Raumschiff B und diesmal misst das Gerät auf
164 Raumschiff B, dass sie gleichzeitig eingeschaltet werden. Was zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A an?
165 S13: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... mmm ... (6 Sekunden Pause; Anm.) ... ich ... also zu dem, was
166 ich jetzt gesagt hab', zu dem anderen ... Beispiel müssen sie sich nicht gleichzeitig an- ... -schalten, wenn
167 ... das jetzt ... bzw., hm. Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich das? Noch immer ...
168 B: 100.000 km/s.
169 S13: Ok. ... (8 Sekunden Pause; Anm.) ... ich, hm ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' da müssen
170 sie sich nicht gleichzeitig ... einschalten, weil eben die Zeit in beiden Bezugsbys-, Bezugssystemen anders
171 vergeht.
172 B: Mhm.
173 S13: Ja.
174 B: Und ... haben sie sich jetzt gleichzeitig eingeschaltet, oder nicht, in der Situation?
175 S13: Das kommt auf ... das Bezugssystem an, aus dem man es betrachtet.
176 B: Ok. Jetzt betrachten wir auf beiden Raumschiffen Messgeräte die Längen exakt bestimmen können.
177 Raumschiff B bewegt sich, relativ zu Raumschiff A, mit 100.000 km/s ... und auf Raumschiff B befindet
178 sich eine Bowlingbahn. Das gerät auf Raumschiff B misst für die Bowlingbahn eine Länge von ... 18,3 m.
179 Welche Länge zeigt dann das Gerät auf Raumschiff A für die Bowlingbahn an?
180 S13: ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ... auf jeden Fall nicht Acht-, also, glaub' ich, nicht 18,3
181 m, weil ... sich eben Raumschiff B, relativ zu Raumschiff A, bewegt ... und ... - wie heißt das? -
182 Längenkontradiktion, oder sowas, haben wir gelernt, dass sich eben ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ...
183 abhängig vom Standpunkt, aus dem man es sieht, die Längen ... verkürzen, oder verlängern, bzw. ver-

184 schieben ... und deswegen würd' ich sagen, dass aus dem, aus der Perspektive von Raumschiff A die
 185 Bowlingbahn ... hm, auf, ich weiß nicht, ob länger, oder kürzer, aber 18,3 m nicht ... lang is.
 186 B: Ok.
 187 S13: Gemessen.
 188 B: Was wäre, was wär dein Tipp eigentlich, länger, oder kürzer?
 189 S13: Mmm, ... (3 Sekunden Pause; Anm.) ... ich würd', ich würd' aus ... Intuition sagen kürzer, weil
 190 sich das Raumschiff B eben schnell vorbeibewegt.
 191 B: Ok. Und, äh, wie kommst du dazu, dass du ... dich für „kürzer“ entscheidest in der Situation?
 192 S13: Weil ich mir ... bildlich irgendwie ... vorstell, so, dass sich das Messgerät, halt, während es sich
 193 vorbeibewegt, dass es nicht die ganze Länge so erfassen kann, wie's normalerweise wäre, sondern, weil
 194 sich's eben so schnell vorbeibewegt nur ein ..., sozusagen, eine Verstauchung heißt das glaub' ich, also es
 195 is kürzer.
 196 B: Ok.
 197 S13: Ja.
 198 B: Jetzt betrachten wir eine Bowlingbahn auf Raumschiff A und das Gerät auf Raumschiff A misst für
 199 diese eine Länge von 18,3 m. Welche Länge zeigt dann das Gerät auf Raumschiff B für die Bowlingbahn
 200 an?
 201 S13: ... mmm ... (7 Sekunden Pause; Anm.) ... ich glaub' ... (5 Sekunden Pause; Anm.) ... ich, also,
 202 ich glaub' wieder nicht 18,3 m, sondern ... die Länge verschiebt sich eben wieder ...
 203 B: Mhm.
 204 S13: ... und ... da ... da jetzt halt A, sozusagen, ruhend is und B bewegt ... würd' ich sagen, dass die
 205 Länge ... wieder verkürzt is, aber ... ich weiß nicht ... weil vorher war ja A, sozusagen, war A ruhend und
 206 die Bowlingbahn auf den bewegten, im bewegten Bezugssystem, deswegen ... ich glaub', dass die Länge
 207 nicht gleich bleibt, aber ich weiß nicht, ob kürzer, oder länger wieder.
 208 B: Und deine Intuition?
 209 S13: Mmm ... würd' wieder sagen kürzer.
 210 B: Ok. Tatsächlich ergibt sich, dass, ... weil, du hast ja vorher angesprochen, dass ... das Messgeräte
 211 das dann nicht ... so erfassen kann, auch wenn das Messgerät das ... richtig erfassen kann alles ... und
 212 die Messung ganz perfekt abläuft, wird trotzdem das relativ zur Bahn bewegte Sy-, Gerät immer ... eine
 213 kürzere Länge messen. Also, das heißt, wie du auch hier (wenn sich die Bahn auf B befindet; Anm.) gesagt
 214 hast, hier wäre das Gerät auf A, relativ zur Bahn, bewegt, hier (wenn sich die Bahn auf A befindet; Anm.)
 215 das Gerät auf B. Und das ... und die beiden messen dann jeweils eine kürzere Länge. Was sagst du dazu?
 216 S13: ... mmm ..., also, jetzt macht's, also, es ... durch den Unterricht, den wir hatten, macht's irgendwie
 217 ein bisschen mehr Sinn ... äh, mit den ... Längenverschiebungen, die wir gelernt haben, ... aber ... so rein
 218 intuitiv hätt ich's, glaub' ich, nicht gewusst, bzw. ... ich hätt' nicht die Geschwindigkeit ... mit einbezogen
 219 in meine ... Überlegungen.
 220 B: Meinst du intuitiv, bevor du den Unterricht hattest ...
 221 S13: Ja.
 222 B: ... und ... vom jetzigen Standpunkt?
 223 S13: Ja. Genau, also, ich, vor'm Unterricht hätt ich's ... entweder mit Glück intuitiv gewusst, oder nicht
 224 gewusst. (lacht)
 225 B: Ok. Jetzt zeigen sie (die beiden Messgeräte; Anm.) jedenfalls verschiedene Werte für die Länge der
 226 Bowlingbahn an. Gibt's da jetzt einen richtigen und einen falschen Wert?
 227 S13: Nein, es kommt wieder auf's Bezugssystem an, aus dem man es sieht.
 228 B: Und welche Länge hat dann die Bowlingbahn?
 229 S13: ... für das bewegte Bezugsbys, Bezugssystem das von dem, ... ähm, Messgerät auf Raumschiff B
 230 und von dem ruhenden Bezugsbys-, ... Bezugssystem die Messung des Messgeräts auf Raumschiff A.
 231 B: Ok. Jetzt betrachten wir ... noch ein Raumschiff, dass sich, relativ zur Erde mit 100.000 km/s bewegt
 232 ... und auf der Erde und auf dem Raumschiff gibt es Messgeräte die Längen exakt bestimmen. Auf der
 233 Erde befindet sich auch eine Bowlingbahn und das Gerät auf der Erde misst für diese die Länge 18,3 m.
 234 Welche Länge zeigt dann das Gerät auf dem Raumschiff für die Bowlingbahn an?

235 S13: ... (4 Sekunden Pause; Anm.) ... ähm, ... ich, also ... wieder nicht 18,3 m, sondern ..., ich würd'
 236 sagen wieder eine verkürzte Länge, weil ... wir haben ja vorher auch ... Raumschiff A gehabt, dass sich
 237 soz-, dass sozusagen das ruhende System war und da jetzt halt ... die Erde, die das ruhende System is ...
 238 B: Mhm.
 239 S13: ..., sozusagen, deswegen würd' ich genau dasselbe wieder sagen, dass die ... Bowlingbahn verkürzt
 240 is für ... das Messgerät im ... auf dem Raumschiff.
 241 B: Mhm. Und, würdest du hier sagen, dass es das einen richtigen und einen falschen Wert gibt?
 242 S13: Nein, es kommt wieder auf's Bezugssystem an, in dem man sich befindet, bzw. aus der, aus welchem
 243 Standpunkt man es sieht.
 244 B: Mhm. ... und welche Länge hat dann die Bowlingbahn?
 245 S13: ... kommt auf die Perspektive an ...
 246 B: Ok.
 247 S13: ... aus dem Bezugssystem.
 248 B: Könnte rein theoretisch auch ... der ..., das Raumschiff als ruhend und die Erde als, relativ dazu,
 249 bewegt betrachtet werden?
 250 S13: ... ja, würd' ich schon sagen, ... also, ... wenn man sich am Raumschiff befindet ...
 251 B: Mhm.
 252 S13: ... und ... man ... selbst sagt, dass man das ruhende System is, dann ... ja, würd' ich schon sagen,
 253 dass das geht.
 254 B: Ok.